



**UNIVERSITÀ
DI PAVIA**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA.**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E
IL TERRITORIO**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**VERSO SUPERMERCATI A BASSO IMPATTO AMBIENTALE:
TECNOLOGIE SOSTENIBILI ED EFFICIENTI PER IL RECUPERO DI ACQUA
DALL'ARIA E LA REFRIGERAZIONE. APPLICAZIONE A UN CASO
STUDIO.**

Candidato: Gabriele Rolè

Matricola: 544842

Relatore: Prof. Magrini Anna

Correlatore: Figoni Roberto

A.A. 2024/2025

Ai miei genitori.

Per avermi insegnato il valore dell'impegno e aver reso possibile, con i loro sacrifici, ogni mio passo.

ABSTRACT

La crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale richiede soluzioni innovative capaci di affrontare congiuntamente le criticità energetiche e idriche degli edifici. In questo contesto, la presente tesi analizza l'integrazione della tecnologia AWG (Atmospheric Water Generator) in un edificio della grande distribuzione organizzata, con l'obiettivo di valutarne le prestazioni energetiche, idriche ed economiche.

Dopo un inquadramento generale delle problematiche legate al cambiamento climatico e alla crisi idrica, viene approfondito il funzionamento della tecnologia AWG, evidenziandone potenzialità e limiti, in particolare la dipendenza dalle condizioni termo-igrometriche e i consumi elettrici associati.

Il caso studio riguarda un supermercato modellato tramite DesignBuilder con motore di calcolo EnergyPlus. Sono stati simulati tre contesti climatici italiani - Milano, Roma e Bari - confrontando uno scenario di riferimento con configurazioni che includono l'AWG e la sua integrazione con un impianto fotovoltaico.

I risultati evidenziano che l'AWG riduce i consumi di gas naturale ma aumenta il fabbisogno elettrico, rendendo determinante il supporto di fonti rinnovabili. Le prestazioni migliori si osservano a Roma, seguita da Bari, mentre Milano risulta meno favorevole. L'analisi economica mostra che l'integrazione con fotovoltaico migliora la sostenibilità complessiva del sistema, senza influire significativamente sul comfort interno.

In conclusione, l'AWG rappresenta una soluzione promettente, la cui efficacia dipende dal contesto climatico e da un'adeguata integrazione impiantistica.

INDICE

1. INTRODUZIONE	6
2. OBIETTIVO DELLA TESI	6
3. CONTESTO INTERNAZIONALE	7
4. PROBLEMATICHE DELL'UTILIZZO IDRICO IN ITALIA	9
5. DISPONIBILITA' DI ACQUA NELL'ARIA	13
5.1. TECNICHE DI ESTRAZIONE DI ACQUA DALL'ARIA MEDIANTE AWG	16
5.1.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	17
5.2. PROCESSO DI POTABILIZZAZIONE	20
5.3. POSSIBILITA' DI UTILIZZO DELL'ACQUA ESTRATTA	23
5.3.1. QUADRO NORMATIVO	23
5.3.2. GESTIONE IDRICA E IMPIANTI SEPARATI.....	23
5.3.3. CATALOGAZIONE DELL'ACQUA RECUPERATA DA SISTEMI AWG.....	24
6. SISTEMI AWG INTEGRATI	25
6.1. INDICATORI PRESTAZIONALI DEGLI AWG	27
6.2. ALCUNI INDICATORI PROPOSTI IN TEMPI RECENTI	29
6.3. AWG IN COMMERCIO	33
6.4. INDICI PRESTAZIONALI	35
6.5. AWG NELLE RIQUALIFICAZIONI ENERGETRICHE	37
6.6. FUNZIONAMENTO E RUOLO DELLE UNITA' DI TRATTAMENTO ARIA	39
6.7. IL FUTURO DELLE MACCHINE AWG	40
7. DEFINIZIONE E INQUADRAMENTO DELLA GRANDE DISTRIBUZIONE ORGANIZZATA	41
7.1. DIFFUSIONE TERRITORIALE DELLA GDO ALIMENTARE IN ITALIA	44
7.2. REPORT DI SOSTENIBILITÀ	46
7.3. ANALISI DI ALCUNI REPORT DI SOSTENIBILITÀ	50
7.3.1. CONFRONTO TECNICO DEI BILANCI DI SOSTENIBILITÀ DELLE PRINCIPALI CATENE GDO ITALIANE	50
7.4. PRATICHE ESTERE NELLA GDO	57
7.5. UNA SOLUZIONE PER L'INCREMENTO DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE	57
8. METODOLOGIA DI ANALISI E STRUMENTI DI SIMULAZIONE	58
8.1. CONFRONTO TRA SIMULAZIONE DINAMICA E STAZIONARIA	62
9. VALIDAZIONE DEI CRITERI INDIVIDUATI AD UN CONTESTO REALE	62
9.1. MODELLO DI SUPERMERCATO	63
9.2. IMPOSTAZIONI DELLA PROCEDURA DI CALCOLO	65
9.2.1. ELABORAZIONE DI DATABASE DI DATI METEO	73

9.3.	MODELLAZIONE DELL'EDIFICIO E DEL SISTEMA HVAC	83
9.4.	ANALISI DEI RISULTATI: IL CASO DI MILANO.....	95
9.4.1.	STATO DI FATTO	106
9.5.	INFLUENZA DEL CONTESTO CLIMATICO	107
9.6.	INTERVENTI MIGLIORATIVI	111
9.6.1.	INTRODUZIONE DI UN SISTEMA AWG	112
9.6.2.	INTRODUZIONE DI UN SISTEMA FOTOVOLTAICO	118
9.6.3.	ANALISI DEI RISULTATI CON INTERVENTI MIGLIORATIVI (AWG E FV).....	120
9.7.	CONSIDERAZIONI SUGLI INTERVENTI MIGLIORATIVI	132
9.8.	INFLUENZA DEL CONTESTO CLIMATICO CON IMPIANTO AWG E FV	132
10.	CONCLUSIONE.....	138
11.	BIBLIOGRAFIA	140

1. INTRODUZIONE

In uno scenario globale definito da pressanti criticità ambientali – tra cui l'accelerazione del cambiamento climatico, l'instabilità energetica e la crescente penuria idrica – il settore dell'ingegneria ambientale è chiamato a una profonda trasformazione.

Questo imperativo di sostenibilità si manifesta con particolare urgenza nelle infrastrutture complesse quali ospedali, centri di ricerca, poli didattici, hub aeroportuali e in generale in tutti i centri di grande consumo energetico e idrico; queste strutture sono caratterizzate da sistemi impiantistici altamente articolati e interconnessi.

In tale contesto, l'efficienza nella gestione delle risorse non è più un elemento opzionale, ma si configura come un requisito primario per assicurare la resilienza operativa, la sostenibilità finanziaria e la riduzione del footprint ecologico nel lungo termine.

Da un punto di vista ingegneristico, i sistemi tecnologici assumono una funzione strategica primaria. Nello specifico, gli impianti HVAC (riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) rappresentano un fattore critico, poiché influenzano direttamente sia il bilancio termico che il fabbisogno idrico complessivo, attraverso i processi di condensazione, umidificazione, raffreddamento e trattamento dell'aria.

L'adozione di soluzioni impiantistiche innovative e integrate per massimizzare l'efficienza energetica e idrica costituisce, pertanto, una risposta tecnica necessaria e prioritaria alle sfide ambientali globali.

2. OBIETTIVO DELLA TESI

La presente ricerca si colloca nel contesto strategico delineato in precedenza, focalizzando l'attenzione sull'ottimizzazione delle performance di un supermercato basato su dati recepiti dalle leggi in vigore creando un modello verosimile ad un impianto esistente. Questa infrastruttura di elevata complessità funzionale rappresenta un caso studio emblematico, dati i suoi elevati carichi termici e la costante richiesta di risorse idriche.

L'intento principale è identificare e quantificare le criticità in termini di efficienza energetica, fabbisogno idrico specifico e gestione dei flussi termici residui del centro tramite un'analisi dei dati forniti. Una volta svolta la prima fase l'obiettivo diventa sviluppare e valutare soluzioni tecnologiche avanzate volte a incrementare le performance complessive del sistema.

L'analisi tecnica si concentra in maniera specifica sul sottosistema di climatizzazione (HVAC), esaminandolo sotto il profilo sia energetico che idrico. Si propone la valutazione di scenari alternativi basati sull'adozione di tecnologie multifunzionali integrate.

Un focus metodologico centrale è posto sul recupero e la valorizzazione delle risorse altrimenti disperse, come l'acqua di condensa. L'integrazione sostenibile ed efficiente di questi flussi recuperati all'interno del ciclo impiantistico esistente è un elemento centrale della proposta.

Oltre alla diagnosi specifica del caso studio, la tesi ambisce a definire un modello metodologico per la valutazione prestazionale. Tale modello si basa sull'impiego di simulazione energetica dinamica e sull'analisi delle performance tramite l'utilizzo di indicatori sintetici (Key Performance Indicators - KPI) specifici per contesti commerciali.

Il lavoro si configura, pertanto, non solo come un caso studio applicativo, ma come un contributo operativo replicabile per contribuire alla transizione ecologica e l'efficientamento energetico-idrico del patrimonio immobiliare complesso ad alta intensità d'uso.

3. CONTESTO INTERNAZIONALE

L'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile è un programma d'azione adottato nel 2015 da tutti i 193 Stati Membri delle Nazioni Unite, finalizzato a guidare governi, sistemi produttivi e comunità verso uno sviluppo equilibrato dal punto di vista ambientale, economico e sociale con l'obiettivo di sradicare la povertà, proteggere il pianeta e garantire prosperità e pace per tutti.

Essa si articola in 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Figura 1) (Sustainable Development Goals – SDGs) e 169 target misurabili, da raggiungere entro il 2030, che mirano a rispondere alle principali crisi globali: cambiamento climatico, scarsità idrica, inquinamento, perdita di biodiversità, crescita dei consumi e pressione sulle infrastrutture.

Nella seguente immagine troviamo tutti gli SDGs di questa agenda; ogni punto è suddiviso in target da raggiungere per completare l'obiettivo.



Figura 1 – Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile – Agenzia per la Coesione Territoriale

In ambito tecnico l'Agenda 2030 rappresenta un quadro di riferimento strategico per la progettazione e l'ottimizzazione degli impianti, orientando le scelte verso soluzioni che garantiscano riduzione dei consumi, riduzione dell'impronta idrica, resilienza operativa e minimizzazione delle emissioni.¹

Il progetto analizzato nella presente tesi, cioè il miglioramento prestazionale di un supermercato mediante ottimizzazione HVAC, recupero dell'acqua, impiego di tecnologie AWG e analisi tramite KPI energetici, rappresenta un'applicazione concreta del paradigma della sostenibilità promosso dall'Agenda 2030.

Di seguito vengono evidenziati i principali collegamenti tra il lavoro svolto e i singoli SDGs.

SDG 6 Acqua pulita e servizi igienico-sanitari

Questo punto promuove l'accesso universale all'acqua potabile, l'uso sostenibile delle risorse idriche (Figura 2) e la riduzione degli sprechi lungo l'intero ciclo idrico.

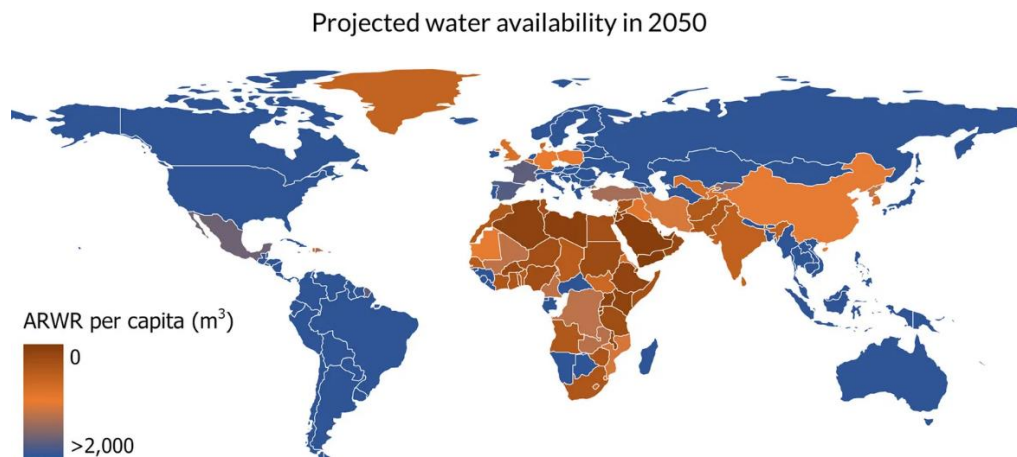


Figura 2 – Disponibilità idrica nel 2050 - Science of The Total Environment

Il sistema AWG e il recupero dell'acqua di condensa contribuiscono direttamente ai target proposti in questo punto grazie alla riduzione dello stress idrico sulla rete attraverso la generazione autonoma di acqua a partire dal vapore atmosferico; all'aumento dell'efficienza idrica mediante la raccolta, filtrazione e reimpiego dell'acqua di condensa, risorsa tipicamente sprecata nei sistemi HVAC tradizionali e al miglioramento della qualità dell'acqua tramite processi di filtrazione, remineralizzazione e trattamenti UV, in linea con gli standard OMS ed europei richiamati nella tesi.

In un supermercato ad alta intensità d'uso, tali interventi riducono significativamente il prelievo idrico dalla rete e i costi associati.

SDG 7 Energia pulita e accessibile

Il settimo punto incoraggia l'efficienza energetica, la riduzione dei consumi e l'aumento della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili o attraverso tecnologie avanzate.

Il lavoro si allinea principalmente al target 7.3 che afferma “Entro il 2030, raddoppiare il tasso globale di miglioramento dell'efficienza energetica”. Questo può avvenire grazie al miglioramento dell'efficienza energetica globale degli impianti HVAC attraverso soluzioni integrate e multifunzionali e grazie alla riduzione dei consumi specifici (kWh/L) del sistema di produzione idrica, soprattutto nei sistemi AWG integrati capaci di recuperare calore dal ciclo frigorifero.

L'eventuale integrazione con energie rinnovabili rafforza ulteriormente la conformità all'SDG 7.

Le macchine AWG utilizzate nel seguente progetto vanno a toccare anche diversi punti di altri obiettivi come per esempio

SDG 9 Industria, innovazione e infrastrutture

Il nono obiettivo invita allo sviluppo di impianti resilienti, efficienti e basati su tecnologie ad alte prestazioni.

Il progetto valorizza tecnologie avanzate e sistemi di controllo digitalizzati, migliorando l'efficienza e la resilienza dell'impianto. L'integrazione di AWG, componenti ad alta efficienza e sensori intelligenti, insieme alla prospettiva futura dei MOF, rende l'infrastruttura coerente con gli obiettivi di innovazione e transizione tecnologica del Green Deal.

SDG 11 Città e comunità sostenibili

Questo punto include edifici intelligenti, gestione efficiente delle risorse e riduzione dell'impatto ambientale delle infrastrutture urbane.

Riducendo consumi idrici ed energetici, il progetto contribuisce a un edificio più efficiente e meno dipendente dalla rete pubblica. Il miglioramento della qualità dell'aria e la valorizzazione della condensa come risorsa favoriscono un approccio di sostenibilità urbana e gestione responsabile delle risorse.

SDG 12 Consumo e produzione responsabili

Il dodicesimo punto incoraggia il recupero dei flussi di risorse, la minimizzazione dei rifiuti e la circolarità dei processi.

L'impianto applica logiche di economia circolare: recupera calore, riutilizza acqua e minimizza sprechi. L'uso di KPI consente un controllo continuo delle prestazioni, favorendo un modello di gestione più sostenibile e rigenerativo rispetto agli impianti tradizionali.

SDG 13 Lotta al cambiamento climatico

Questo punto mira a richiamare la necessità di ridurre le emissioni climalteranti e aumentare la resilienza dei sistemi energetici.

L'ottimizzazione energetica dell'HVAC e l'impiego degli AWG riducono le emissioni indirette di CO₂ e aumentano l'autonomia idrica dell'edificio. Ciò rende l'infrastruttura più resiliente ai cambiamenti climatici e allineata alle politiche europee e nazionali in materia di energia e clima.

4. PROBLEMATICHE DELL'UTILIZZO IDRICO IN ITALIA

Negli ultimi anni l'Italia ha sperimentato una crescente variabilità idrologica; aree caratterizzate da precipitazioni abbondanti si alternano a periodi di siccità prolungata (Grafico 1), con impatti rilevanti sulla disponibilità di risorse superficiali e sotterranee. Le analisi nazionali ed europee indicano che molti bacini e falde mostrano uno stato di pressione idrica persistente, che si traduce in rischio di scarsità e vulnerabilità per usi civili, industriali e agricoli.² Nel 2022, parte del territorio

italiano ha vissuto una siccità molto severa: circa il 20% del territorio era in condizione di siccità estrema e il 40% in siccità severa o moderata.³

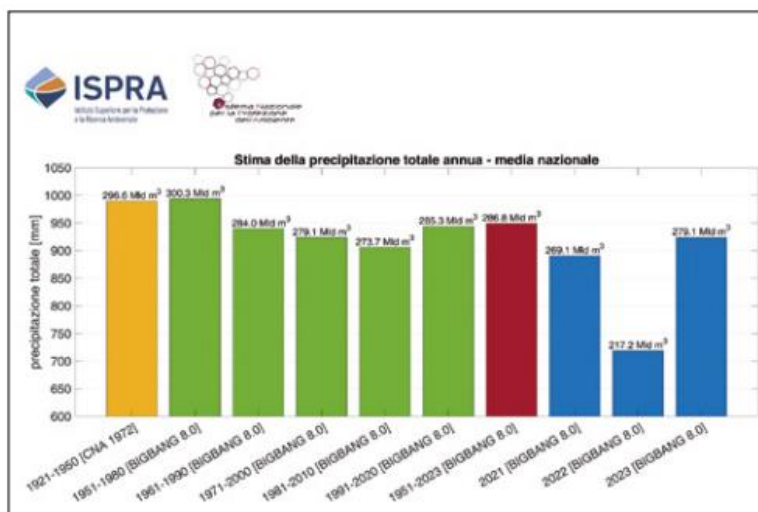


Grafico 1 – Precipitazione totale annua media sull'Italia – ISPRA

Perdite di rete

Una delle criticità strutturali più gravi è legata alle perdite nella rete di distribuzione. Il report ISTAT dedicato al servizio idrico segnala che l'Italia perde una quota significativa dell'acqua immessa nelle reti: valori intorno al 40–42% di perdite sono stati riscontrati nel periodo di riferimento (Grafico 2), una quantità che equivale a miliardi di metri cubi persi ogni anno e che avrebbe potuto soddisfare il fabbisogno idrico annuale di 43,4 milioni di persone per un anno. Questa inefficienza non è solo idrica ma anche energetica ed economica (Grafico 3), poiché l'acqua dispersa richiede energia e trattamento a monte.⁴

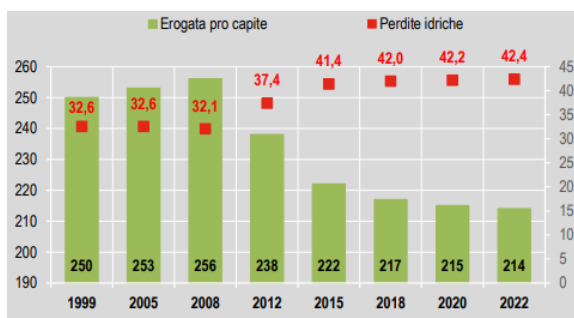


Grafico 2 – Acqua erogata pro capite e perdite idriche totali in distribuzione – ISTAT

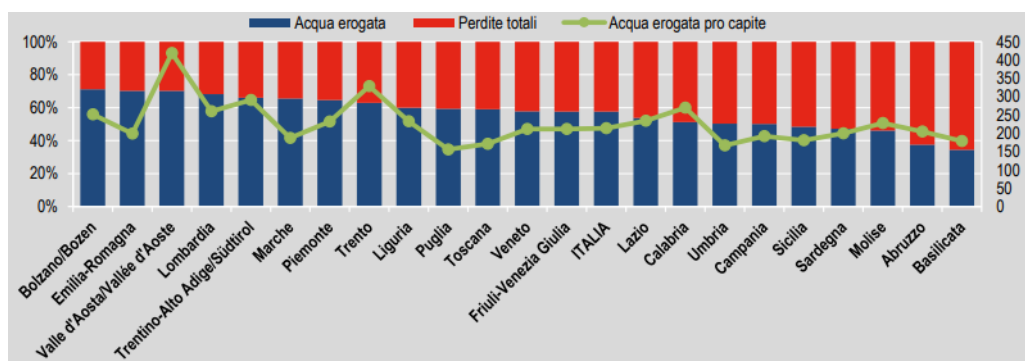


Grafico 3 – Acqua erogata e perdite idriche totali nelle reti di distribuzione per regione (2022) - ISTAT

La situazione di siccità

Nel periodo 2023–2024 si sono verificate condizioni di siccità critiche (Grafico 4) soprattutto nelle regioni meridionali e nelle isole maggiori. In particolare, la Sicilia ha vissuto uno stato di emergenza idrica con invasi fortemente svuotati e impatti severi sull'agricoltura locale.⁵

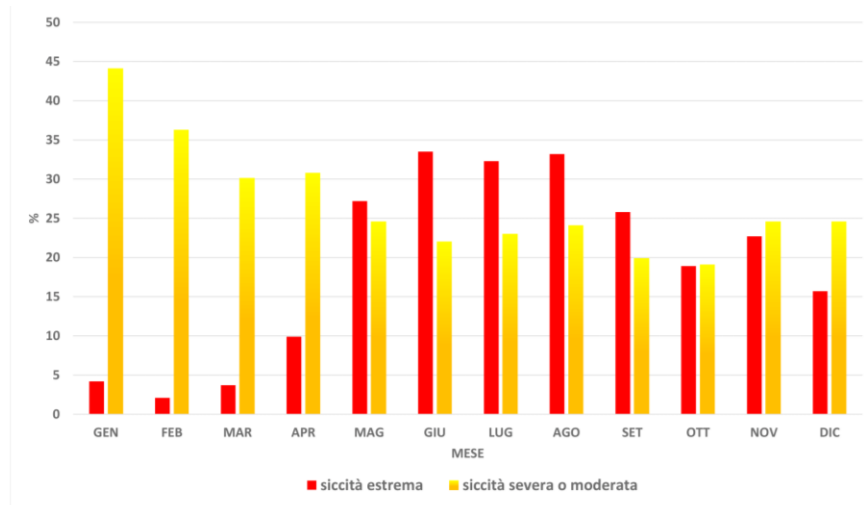


Grafico 4 – Percentuali del territorio nazionale soggetto nel 2024 a condizioni di siccità estrema e siccità grave o moderata su una scala temporale di 12 mesi - ISPRA

Irrigazione a goccia

L'agricoltura è il comparto che assorbe la quota maggiore di risorse idriche in Italia. Una porzione rilevante (circa il 50%) dei prelievi nazionali è destinata all'irrigazione. In alcune aree agricole intensive, il prelievo mette sotto stress risorse sotterranee e invasi di accumulo.

La microirrigazione a goccia, dove risulta possibile, è riconosciuta come una delle soluzioni tecniche più efficaci per ridurre i consumi idrici in agricoltura, aumentandone l'efficienza. Studi sul contesto italiano mostrano che l'adozione di tecnologie di risparmio idrico può raggiungere efficienze d'uso dell'acqua molto superiori rispetto ai sistemi tradizionali, con risparmi significativi: in molte applicazioni l'efficienza utile dell'irrigazione può avvicinarsi o superare l'80–90% rispetto a pratiche a pioggia o per scorrimento.⁶

Opzioni di mitigazione

Per affrontare la crisi idrica sono necessari interventi su più livelli:

- Riduzione delle perdite di rete.
- Diffusione dell'irrigazione di precisione.
- Economia circolare dell'acqua, promuovere il riuso qualificato di acque depurate per usi agricoli e tecnici e aumentare la percentuale di terreni irrigati con acque reflue trattate.
- Sistemi decentralizzati e fonti alternative, in contesti puntuali l'impiego di soluzioni decentralizzate (serbatoi, riciclo, AWG per usi specifici) può

fornire capacità di resilienza locale. L'AWG può essere complemento dove le condizioni climatiche lo consentono o per usi non potabili; il suo valore è massimo se integrato in strategie più ampie di gestione della domanda.

Consumo idrico di un supermercato e rilevanza nel contesto della crisi idrica

Un supermercato, pur non essendo fra le attività più idricamente intensive come agricoltura o industria, utilizza una quantità non trascurabile di acqua, distribuita su vari impieghi. Secondo un'analisi per il settore della grande distribuzione e vendita al dettaglio circa metà del consumo idrico di un supermercato può essere attribuito agli impianti di refrigerazione (condensatori per banchi frigoriferi, celle frigorifere, vetrine per prodotti deperibili), che richiedono acqua per raffreddamento. I servizi igienici possono rappresentare fino al 17 % del consumo idrico complessivo di un supermercato e abbiamo altri impieghi come pulizie, lavaggio di prodotti freschi, eventualmente irrigazione di aree verdi esterne e lavaggio pavimenti che aggiungono consumo supplementare.⁷

Nella parte della tesi riservata al caso studio vedremo dei dati rilevanti e come possono essere suddivisi i consumi di acqua in un supermercato di circa 2500 m².

In termini di stress idrico locale se un supermercato è inserito in un'area già in condizione di siccità o stress idrico anche questi consumi possono rappresentare una pressione aggiuntiva non trascurabile, soprattutto perché l'acqua usata per refrigerazione deve essere continua, 365 giorni l'anno, e perché un incremento di raccolta utenti (popolazione servita) o inefficienze (perdite, sprechi) possono amplificare il consumo. Inoltre, se tanti esercizi commerciali insistono nella stessa zona, l'impatto aggregato può diventare significativo.

Potenzialità dei sistemi AWG

Un sistema di estrazione d'acqua da aria (Atmospheric Water Generator, AWG) potrebbe offrire alcuni vantaggi se integrato in un supermercato, soprattutto in contesti idrici fragili grazie alla riduzione del prelievo da risorse convenzionali, l'AWG produce acqua dall'atmosfera, diminuendo la dipendenza da acquedotti, falde sotterranee e invasi utilissimo in zone soggette a scarsità o siccità. Come vedremo l'acqua generata può essere utilizzata per servizi igienici, pulizie, raffreddamento (se la qualità lo consente), lavaggio di superfici, senza attingere alle risorse idriche locali.

Tuttavia, come si vedrà in seguito, ci sono limiti e fattori critici da considerare:

- La resa di un AWG dipende molto da condizioni ambientali (umidità e temperatura).
- Spesso l'AWG non fornisce grandi quantità come un acquedotto; quindi, l'AWG può al massimo integrare una parte del fabbisogno non sostituirlo completamente.
- L'acqua generata va trattata e verificata per usi igienico-sanitari o alimentari; per usi "tecnici" (irrigazione, pulizie) può essere appropriata, ma serve una verifica caso per caso.
- Produrre acqua dall'aria richiede energia elettrica e manutenzione regolare cosa che impatta sui costi gestionali del supermercato.

5. DISPONIBILITA' DI ACQUA NELL'ARIA

La disponibilità di acqua nell'atmosfera rappresenta il presupposto fisico imprescindibile per il funzionamento di qualsiasi tecnologia di estrazione d'acqua dall'aria (Atmospheric Water Generation, AWG). Prima di affrontare gli aspetti impiantistici e prestazionali delle macchine AWG, risulta pertanto necessario comprendere i meccanismi che regolano la presenza del vapore acqueo nell'atmosfera, i parametri ambientali che ne influenzano la concentrazione e l'evoluzione spazio-temporale di tali grandezze.

Il vapore acqueo costituisce una componente minoritaria dell'atmosfera terrestre, ma il suo ruolo è di primaria importanza nei processi energetici, climatici e idrologici. La sua presenza non è casuale, bensì deriva dall'interazione dinamica tra radiazione solare, superficie terrestre e meccanismi di scambio termodinamico che definiscono il ciclo idrologico.⁸

Comprendere questi fenomeni permette di delineare le condizioni che rendono tecnicamente ed energeticamente conveniente l'estrazione di acqua dall'aria.

Origine della presenza di vapore acqueo nell'atmosfera

La presenza di acqua in forma di vapore nell'atmosfera è una conseguenza diretta del ciclo idrologico, il processo naturale che trasferisce acqua tra oceani, suolo, biosfera e atmosfera.⁹ La principale fonte di vapore è l'evaporazione, attraverso la quale oceani, mari, laghi, fiumi e superfici umide rilasciano nell'aria molecole d'acqua quando ricevono sufficiente energia solare per passare dallo stato liquido a quello gassoso.¹⁰ Si stima che circa il 90% del vapore atmosferico derivi proprio dall'evaporazione oceanica.¹¹

Un ruolo altrettanto importante è svolto dalla traspirazione, mediante cui le piante rilasciano vapore attraverso le foglie: nelle aree densamente vegetate questo processo può contribuire molto all'umidità atmosferica, rendendo la biosfera una componente essenziale del bilancio idrico dell'aria. In alcune regioni fredde, inoltre, una parte dell'acqua passa direttamente dalla fase solida a quella di vapore attraverso la sublimazione, che coinvolge neve e ghiaccio e rappresenta un'ulteriore fonte di umidità.

Il vapore acqueo così immesso viene continuamente trasportato, ridistribuito e rimosso attraverso i processi meteorologici (condensazione, precipitazioni, moti convettivi). La sua quantità in ogni luogo è quindi il risultato dinamico di un equilibrio tra apporto e rimozione.¹²

Parametri che determinano la quantità di vapore nell'aria

La quantità di vapore che l'aria può effettivamente contenere è determinata da diversi fattori fisici e geografici, ma tra tutti la temperatura è senza dubbio il parametro più influente.

L'aria più calda può contenere quantità di vapore acqueo molto maggiori rispetto all'aria fredda. Questo comportamento è descritto dalla relazione fisica tra temperatura e pressione di saturazione del vapore (Figura 3).

- A 10 °C, l'aria può contenere circa 9 g/m³ di vapore.

- A 20 °C, la capacità sale a circa 17 g/m³.
- A 30 °C, raggiunge circa 30 g/m³.

Questo incremento non è lineare, ma segue un andamento esponenziale, motivo per cui anche piccoli aumenti di temperatura comportano variazioni significative nella quantità di vapore disponibile.¹³

Per descrivere il contenuto di umidità si utilizzano due grandezze psicrometriche fondamentali: umidità assoluta, che indica la massa di vapore presente in un metro cubo d'aria, e umidità relativa (UR) (Figura 4), che esprime in percentuale quanto vapore è presente rispetto alla quantità massima che l'aria potrebbe contenere alla stessa temperatura. Sebbene l'umidità relativa sia un parametro molto diffuso e semplice da misurare, non rappresenta direttamente l'acqua realmente disponibile per un sistema di raccolta.¹³ È infatti l'umidità assoluta a determinare il potenziale idrico effettivo per gli AWG.

Un altro indicatore essenziale è il punto di rugiada, che misura in modo diretto la quantità di vapore in atmosfera; maggiore è la quantità di vapore, maggiore sarà la temperatura alla quale avverrà la condensazione. Indica la temperatura alla quale l'aria deve essere raffreddata affinché inizi la condensazione.¹⁴ Ad esempio, se il punto di rugiada è 20 °C, l'aria comincerà a condensare una volta raffreddata fino a tale valore; se l'aria fosse più secca, sarebbe necessario raggiungere temperature più basse per ottenere lo stesso risultato.

Anche la pressione atmosferica influisce sulla capacità igrometrica dell'aria. A parità di temperatura, salendo di quota la pressione diminuisce e l'aria può trattenere meno vapore. Infine, la circolazione atmosferica contribuisce a redistribuire continuamente il vapore a livello regionale.¹⁵ Venti, brezze marine, correnti ascensionali e fronti meteorologici possono trasferire rapidamente masse d'aria più o meno umide, determinando variazioni anche significative nel contenuto di vapore disponibile in una determinata zona.¹⁰

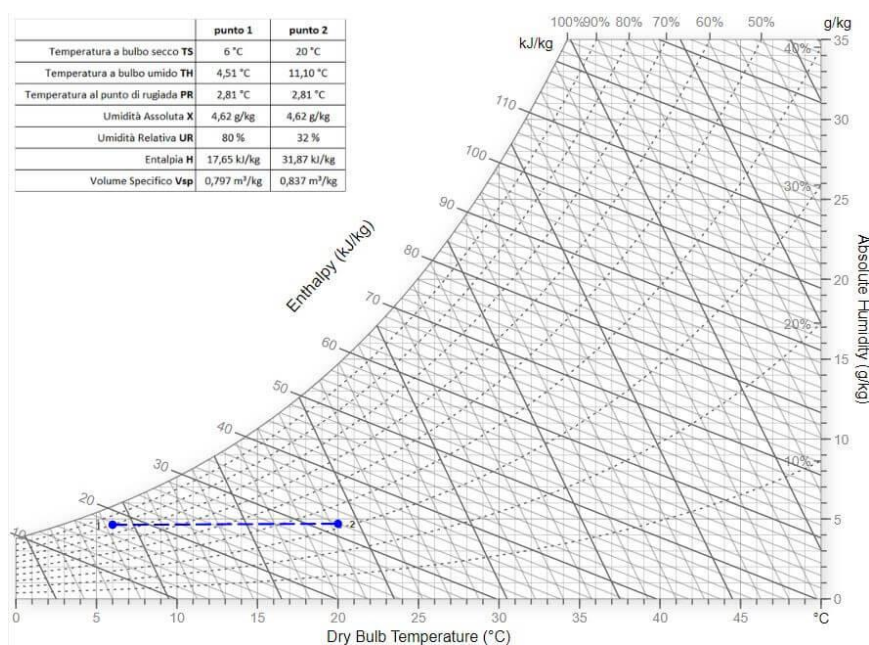


Figura 3 – Diagramma psicometrico - solerpalau

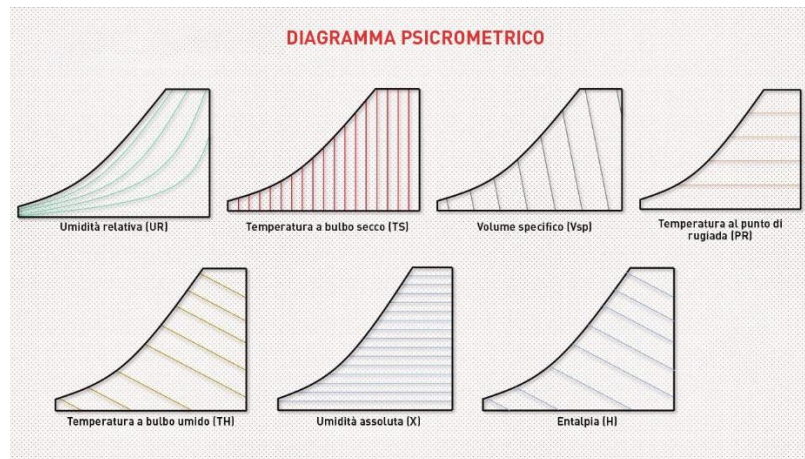


Figura 4 – Chiave di lettura del diagramma psicrometrico - solerpalau

Processi di incremento e riduzione dell'umidità atmosferica

La concentrazione di vapore acqueo non è costante, ma varia continuamente in funzione dei fenomeni meteorologici e delle condizioni radiative sopracitate.

- Evapotraspirazione la quale aumenta il contenuto di umidità nell'aria grazie all'apporto di vapore da superfici acquatiche e dalla vegetazione.
- Precipitazioni le quali diminuiscono il contenuto di umidità a causa della rimozione del vapore condensato dall'atmosfera che viene riportato sulla superficie terrestre.
- Perturbazioni e moti verticali che modificando la pressione barometrica ridistribuiscono l'umidità, le masse d'aria umida salgono, si espandono e si raffreddano adiabaticamente. Questo raffreddamento porta alla condensazione del vapore in nuvole e spesso a precipitazioni, diminuendo il vapore acqueo nell'aria residua.¹⁰

Variabilità geografica e stagionale della disponibilità di vapore

La quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera varia notevolmente in funzione delle caratteristiche climatiche e geografiche delle diverse regioni del pianeta.

Nelle regioni tropicali e subtropicali, così come nelle zone costiere soggette all'influenza marina, l'aria è spesso calda e umida, condizioni ideali per una elevata concentrazione di vapore. Anche i centri urbani caratterizzati da isole di calore mostrano livelli di umidità assoluta relativamente elevati, grazie alle temperature superiori rispetto alle aree rurali circostanti. Un altro esempio significativo è rappresentato dalle foreste pluviali, dove la combinazione di alte temperature, abbondante vegetazione ed elevata evapotraspirazione garantisce una disponibilità costante di vapore acqueo.

Situazione opposta si riscontra invece nelle regioni interne continentali, nei deserti caldi, nelle zone montane e, più in generale, in tutte le aree soggette a climi temperati durante l'inverno. Pur essendo calde, le aree desertiche presentano spesso valori di umidità relativa estremamente bassi, rendendo l'aria povera di vapore. Le regioni montane, a causa della minore pressione atmosferica e delle temperature ridotte, presentano condizioni ancor meno favorevoli.

Anche su scala giornaliera il contenuto di vapore può oscillare in maniera sensibile. Durante le ore diurne il riscaldamento solare favorisce l'evaporazione e tende ad aumentare l'umidità assoluta. Al contrario, durante la notte l'abbassamento delle temperature provoca un aumento dell'umidità relativa ma una diminuzione del contenuto effettivo di vapore.¹⁶

5.1. TECNICHE DI ESTRAZIONE DI ACQUA DALL'ARIA MEDIANTE AWG

L'estrazione di acqua dall'aria rappresenta una delle applicazioni più innovative nel panorama delle tecnologie per la gestione sostenibile delle risorse idriche. I sistemi di Atmospheric Water Generation (AWG) si basano sulla capacità dell'atmosfera di contenere vapore acqueo, una risorsa potenzialmente disponibile ovunque, purché siano rispettate determinate condizioni termoigrometriche viste in precedenza.

L'interesse verso questa tecnologia nasce dalla possibilità di produrre acqua in modo decentralizzato, riducendo il prelievo dalle fonti convenzionali e limitando l'impatto sulle reti idriche. A differenza di altre soluzioni di approvvigionamento, l'AWG non necessita di sorgenti idriche locali, ma richiede un adeguato apporto energetico, aspetto che costituisce tuttora uno dei principali fattori critici. Per questo motivo, l'efficacia e la sostenibilità del sistema dipendono fortemente dal clima locale, dal livello di integrazione impiantistica e dall'eventuale supporto di fonti rinnovabili.

A livello operativo, le tecnologie AWG adottano due approcci principali: la condensazione attiva mediante cicli termodinamici e l'adsorbimento tramite materiali igroscopici (Figura 5). In entrambi i casi l'acqua ottenuta deve essere sottoposta a trattamenti adeguati a garantirne la qualità finale, ma la differenza tra i sistemi riguarda la modalità di recupero del vapore e il fabbisogno energetico richiesto. È proprio in questa fase che i sistemi presentano caratteristiche peculiari rispetto ad altri impianti HVAC ma le macchine AWG sono progettate con componenti specificamente ottimizzati per garantire sia l'efficienza della condensazione sia la sicurezza igienico-sanitaria dell'acqua prodotta, aspetto che verrà approfondito successivamente.

Le tecnologie AWG offrono vantaggi particolarmente rilevanti laddove i sistemi HVAC sono già presenti e operativi, poiché parte del processo di deumidificazione può essere integrato o recuperato: ciò consente di ridurre i consumi specifici (kWh/L) e migliorare la sostenibilità energetica della produzione. In questo senso, edifici complessi come centri commerciali, aeroporti, ospedali e infrastrutture ad alta intensità energetica rappresentano un contesto applicativo privilegiato. Laddove invece l'umidità atmosferica è molto bassa, condizione frequente in zone aride, la resa degli AWG si riduce sensibilmente; tuttavia, in tali regioni l'utilizzo esteso di sistemi HVAC può creare opportunità per soluzioni integrate, come le unità combinate AWG–HVAC, che ottimizzano l'energia impiegata nei processi di raffreddamento.¹⁷

L'estrazione di acqua dall'aria tramite sistemi AWG costituisce una tecnologia promettente, capace di creare nuove fonti di approvvigionamento idrico in modo sostenibile, soprattutto quando integrata con impianti di climatizzazione avanzati e alimentata da energie rinnovabili. I dettagli relativi ai principi termodinamici, alle

configurazioni impiantistiche e ai trattamenti necessari per garantire la qualità dell'acqua prodotta verranno approfonditi nei paragrafi successivi.

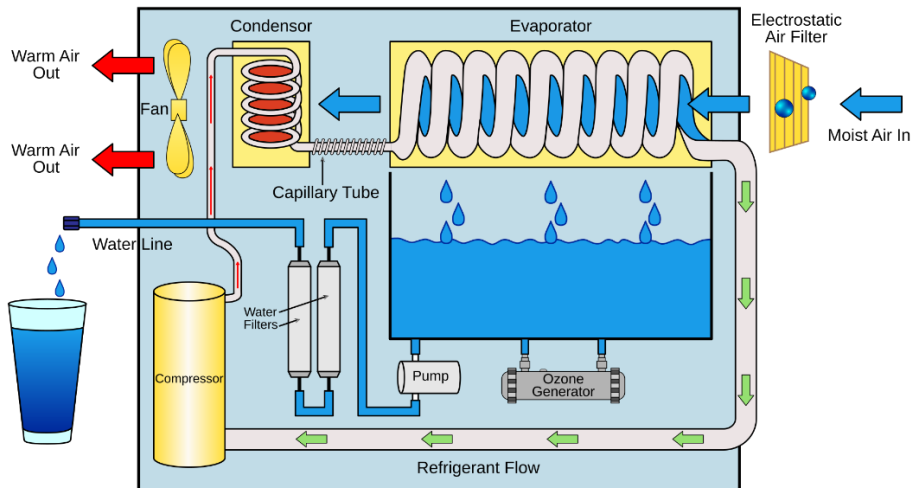


Figura 5 – Schema di funzionamento macchina AWG

5.1.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Gli AWG (*Atmospheric Water Generator*) operano sfruttando un principio termodinamico primario la trasformazione del vapore acqueo atmosferico in fase liquida attraverso il raffreddamento dell'aria al di sotto del suo punto di rugiada (*dew point*). Questo meccanismo consente di convertire l'umidità atmosferica in acqua.¹⁸

I dispositivi AWG possono essere classificati in base al meccanismo di funzionamento e al fabbisogno energetico esterno necessario per innescare e sostenere il processo di condensazione: metodologie attive e metodologie non attive (o passive).¹⁹

Le metodologie attive sono caratterizzate dalla necessità di un apporto elettrico significativo per funzionare. Questa energia è utilizzata per azionare componenti meccanici e termodinamici che forzano il raffreddamento dell'aria al di sotto del punto di rugiada.

Le metodologie non attive si basano su principi naturali riducendo o eliminando il consumo di energia elettrica per il funzionamento primario del sistema. Sono spesso meno efficienti in termini di volume d'acqua prodotto rispetto ai sistemi attivi.

Le principali metodologie non attive sono:

- Condensazione radiativa notturna. Sfrutta l'abbassamento della temperatura notturna per raffreddare una superficie al di sotto del punto di rugiada, condensando il vapore acqueo.¹⁹
- Adsorbimento e desorbimento solare. Utilizza materiali igroscopici che adsorbono il vapore acqueo dall'aria a temperatura ambiente; l'acqua viene poi rilasciata (desorbimento) riscaldando il materiale con energia solare termica.²⁰

- Condensazione con superfici igroscopiche/idrofobiche. Utilizza materiali con geometrie e rivestimenti superficiali specifici per facilitare la nucleazione e il distacco delle goccioline d'acqua. Ottima in contesti di nebbia o umidità elevata.²¹

Estrazione d'acqua tramite ciclo a compressione di vapore (VCRC)

Tra le metodologie attive, le soluzioni che si basano sul Ciclo di Refrigerazione a Compressione di Vapore (VCRC) (Figura 6) sono attualmente le più consolidate sul mercato, grazie alla loro elevata efficienza in termini di produzione di acqua. Tuttavia, questi dispositivi sono caratterizzati da alti consumi energetici, che variano da 0,3 fino a 5 kWh per ogni litro d'acqua prodotto a seconda delle condizioni ambientali.

Il meccanismo di funzionamento può essere così descritto:

- Un flusso d'aria viene indirizzato da un ventilatore all'interno di un evaporatore.
- L'aria cede calore al fluido refrigerante, il quale subisce una vaporizzazione a una temperatura inferiore al punto di rugiada dell'aria.
- L'aria, raffreddandosi, subisce la condensazione del vapore acqueo.
- Il calore assorbito viene ceduto attraverso un condensatore, dove il refrigerante ritorna allo stato liquido.
- Infine, una valvola di espansione (o laminazione) ripristina le condizioni iniziali del refrigerante, chiudendo il ciclo.

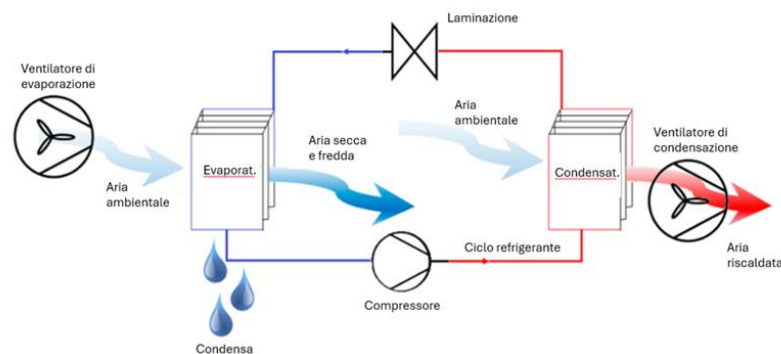


Figura 6 – Schema di funzionamento di un AWG con ciclo di refrigerazione a compressione di vapore VCRC - Performance Assessment of Atmospheric Water Generators

Un AWG standard basato su VCRC richiede energia per alimentare il compressore e le ventole. È importante sottolineare che il processo di condensazione esige un apporto energetico maggiore di quello necessario per una comune macchina frigorifera per il trattamento e la refrigerazione dell'aria se si intende ottenere volumi significativi di acqua (nell'ordine di centinaia o migliaia di litri giornalieri).

In un AWG VCRC convenzionale, tutta l'energia impiegata serve per un unico risultato utile, cioè l'estrazione d'acqua, a fronte di un consumo significativo di energia. Utile in determinati contesti, ma poco sostenibile per un'applicazione diffusa.²²

La condensazione del vapore atmosferico

Come visto in precedenza, l'aria atmosferica contiene una quantità variabile di vapore acqueo (Grafico 5), conosciuta come umidità atmosferica. Questa variabilità è il risultato di un complesso equilibrio dinamico all'interno del ciclo idrologico.

Amount (L/day)	Temperature										
	15°C	18°C	21°C	24°C	27°C	30°C	33°C	36°C	39°C	42°C	
Humidity	30%	12.6	14.2	22.4	48.4	61.4	71.6	85.8	106.6	112.2	117.8
	40%	24.2	37.8	55.6	97.2	127.4	148.4	176.8	200.4	217.8	230.2
	50%	32.8	86.6	115.6	155.6	194.6	226.8	256.0	290.6	317.6	332.4
	60%	66.8	165.2	199.4	236.6	264.0	303.4	336.2	366.6	410.4	423.8
	70%	119.4	211.6	266.4	310.4	337.4	383.2	425.6	426.6	432.0	435.6
	80%	150.4	245.0	323.4	377.4	405.8	462.2	489.6	442.8	445.2	447.0
90%	166.6	267.0	357.6	420.6	450.8	501.8	504.6	456.6	450.6	-	

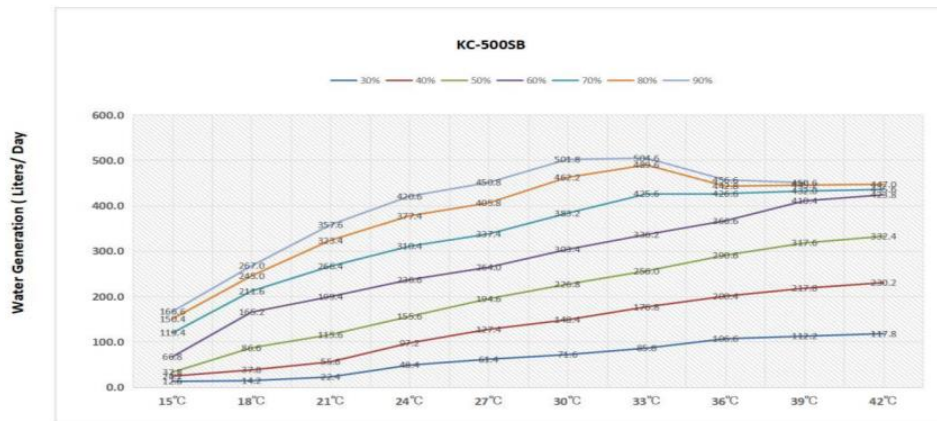


Grafico 5 – Esempio produzione di acqua con una macchina da 500 L/giorno P500 C FND – AWG Europe

Relazione tra temperatura, energia e rendimento degli AWG

La resa idrica della macchina AWG è determinata da una serie di fattori, quali:

- Il flusso volumetrico di aria processata (m^3/h).
- I parametri termoigrometrici (temperatura e umidità relativa) dell'aria in ingresso.
- L'efficienza di scambio termico dell'evaporatore.
- La superficie di contatto e la velocità del flusso d'aria.

Le variazioni di temperatura dell'aria non influenzano solo la quantità di vapore disponibile, ma incidono direttamente sulla quantità di energia necessaria per estrarlo attraverso processi di condensazione artificiale. Il rendimento degli AWG è quindi strettamente correlato al clima locale.

In un clima caldo, dove l'aria contiene naturalmente una maggiore quantità di vapore, il punto di rugiada è più elevato. Questo significa che l'AWG deve sottrarre una quantità inferiore di calore all'aria per raggiungere la temperatura necessaria alla condensazione. Di conseguenza, l'energia richiesta per produrre un litro d'acqua è minore, permettendo al sistema di raggiungere una resa oraria più elevata con un consumo energetico più contenuto.

Viceversa, in climi freddi la disponibilità di vapore acqueo nell'aria diminuisce rapidamente al diminuire della temperatura. L'AWG è quindi costretto a raffreddare

l'aria a temperature molto più basse per ottenere la condensazione, aumentando notevolmente il carico sul ciclo frigorifero. Poiché l'aria contiene meno vapore, il sistema deve trattare volumi maggiori per ottenere la stessa quantità d'acqua, con un conseguente incremento del consumo energetico specifico. L'efficienza complessiva delle macchine AWG risulta quindi sensibilmente ridotta.²³

Per massimizzare la produzione idrica, i sistemi più evoluti adottano scambiatori di calore ad alta efficienza, spesso in alluminio (trattamenti idrofili), rame o acciaio inox, caratterizzati da geometrie ottimizzate (alettature o microcanali)²⁴ per amplificare la superficie di interazione con l'aria.

Come vedremo nel capitolo successivo l'acqua raccolta può avere diversi usi e in base a questi riceve svariati trattamenti. A seguire illustreremo tutti i possibili trattamenti che si possono effettuare.

Sebbene l'acqua ottenuta per condensazione atmosferica sia naturalmente priva di sali, essa può veicolare contaminanti aerodispersi o derivanti dalle superfici di raccolta (come polveri sottili, cariche batteriche, composti organici volatili e metalli). Di conseguenza, un ciclo di trattamenti successivi alla condensazione è essenziale per garantirne la potabilità.

5.2. PROCESSO DI POTABILIZZAZIONE

- *Filtrazione meccanica iniziale (prefiltrazione):*

Questa prima fase ha il compito di intercettare le impurità solide di dimensioni macroscopiche (come sabbia, microplastiche, spore e particolato grossolano) presenti nell'acqua condensata. I filtri utilizzati (tipicamente in polipropilene) hanno una porosità che varia generalmente tra 10 e 1 micron. Questa barriera fisica è essenziale per proteggere e assicurare l'integrità delle fasi di trattamento più sensibili, come le membrane e i dispositivi UV, da potenziali intasamenti.²⁵

- *Adsorbimento con carboni attivi:*

La filtrazione basata su carbone attivo (granulare o in blocco) sfrutta il meccanismo dell'adsorbimento per catturare i contaminanti organici disciolti. È particolarmente efficace nella rimozione di VOC (Volatile Organic Compounds), cloro residuo, pesticidi e sostanze che influiscono negativamente su gusto e odore. La struttura altamente porosa del carbone, con una vasta superficie interna, consente di trattenere molecole anche di piccole dimensioni, migliorando sensibilmente la qualità organolettica.²⁶

- *Osmosi inversa (opzionale):*

Questo processo a membrana è un metodo di separazione avanzato che isola l'acqua pura da un'ampia gamma di contaminanti disciolti. Richiede l'applicazione di una pressione elevata (4–7 bar) per forzare l'acqua attraverso una membrana semipermeabile. L'osmosi inversa è estremamente efficace nel trattenere metalli pesanti, sali minerali in eccesso, nitrati, virus e molecole organiche complesse. Il risultato è acqua di elevatissima purezza, ma quasi totalmente demineralizzata, rendendo necessario un successivo bilanciamento salino per il consumo umano. L'osmosi inversa è adottata principalmente nei sistemi AWG più sofisticati e complessi.²⁷

- *Remineralizzazione controllata:*

In seguito a processi come la condensazione o l'osmosi inversa, l'acqua risulta con un TDS (Total Dissolved Solids) prossimo allo zero, cioè priva di minerali disciolti. Per ristabilire un equilibrio biologico e migliorarne il sapore, si procede alla remineralizzazione. Questa può essere realizzata tramite l'impiego di cartucce che rilasciano sali essenziali (come calcio, magnesio e potassio) o attraverso sistemi di dosaggio proporzionale di soluzioni concentrate. Tale passaggio è essenziale per assicurare un adeguato apporto elettrolitico e migliorarne le proprietà organolettiche e nutrizionali.²⁸

- *Sterilizzazione con luce UV-C:*

La disinfezione mediante raggi ultravioletti a 254 nm (UV-C) è un efficace trattamento fisico per l'inattivazione dei patogeni. La luce UV-C distrugge il materiale genetico di virus, batteri e protozoi, impedendone la riproduzione. Questo processo avviene in apposite camere con lampade schermate (spesso rivestite in acciaio inox per massimizzare la riflessione). Non alterando la composizione chimica dell'acqua e non richiedendo agenti chimici, garantisce un'elevata sicurezza microbiologica senza compromettere la qualità.²⁹

- *Filtrazione di sicurezza finale:*

Prima dell'erogazione, viene solitamente installato un microfiltro con porosità intorno a 0,2 micron. Questa funge da ultima linea di difesa per intercettare eventuali residui particellari o microbiologici sfuggiti ai passaggi precedenti. Tale filtro, conforme agli standard di potabilità, è particolarmente importante nei sistemi ad uso continuo per prevenire contaminazioni nel tratto terminale del circuito e garantire la qualità costante del prodotto finale.³⁰

Conformità e standard qualitativi

I moderni sistemi AWG sono ingegnerizzati non solo per produrre acqua, ma anche per assicurare che il prodotto finito soddisfi in modo rigoroso gli standard sanitari e qualitativi internazionali, risultando idoneo al consumo umano secondo le normative vigenti.

Per essere definita potabile, infatti l'acqua deve rispettare specifici parametri chimici, fisici, microbiologici e organolettici stabiliti dai principali organismi di regolamentazione:

- *OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità):* Le Linee guida per la qualità dell'acqua potabile fungono da riferimento globale. Stabiliscono i limiti massimi per una vasta gamma di contaminanti, tra cui metalli pesanti, nitrati, patogeni, pesticidi, TDS, pH e torbidità, costituendo il pilastro della sicurezza sanitaria.³¹
- *EPA (Environmental Protection Agency – USA):* L'agenzia statunitense definisce i requisiti minimi di potabilità attraverso il *Safe Drinking Water Act*. Specifica gli *MCLs (Maximum Contaminant Levels)* per sostanze come arsenico, piombo, fluoruri e microrganismi, introducendo anche criteri sulle *Best Available Technologies*.³²

- Direttiva 2020/2184/UE (*Unione Europea*): Aggiornando la precedente direttiva 98/83/CE, introduce un approccio olistico (*One Health*). Tra le novità vi sono l'introduzione di limiti più severi per contaminanti emergenti (es. *PFAS*), il controllo della radioattività, e l'obbligo di trasparenza sui dati per i consumatori. Essa vincola gli Stati membri a promuovere l'uso sostenibile delle risorse.³³

Strumentazione di monitoraggio e controllo qualità

Per assicurare la conformità normativa continua si possono equipaggiare gli AWG integrati con sensori digitali per il monitoraggio in tempo reale dei parametri critici dell'acqua in uscita.

I misuratori più utilizzati includono:

- TDS (*Total Dissolved Solids*): Misura la concentrazione di sali disciolti (range ottimale raccomandato: 100–500 mg/L).
- pH: Indica il livello di acidità o basicità (range ottimale per la potabilità: 6,5–8,5).
- Conducibilità elettrica: Parametro indiretto della presenza ionica; valori elevati segnalano potenziale salinità.
- Torbidità: Indicatore ottico della presenza di particelle in sospensione.
- Temperatura e ORP (*Potenziale di Ossido-Riduzione*): Monitorati in sistemi avanzati.

I range di valori ottimali sono presenti nei documenti sopracitati.

I dati raccolti sono visualizzati su interfacce digitali locali o trasmessi a sistemi di supervisione remota.

Funzioni automatiche di manutenzione

Per mantenere un elevato standard igienico, prevenire la formazione di biofilm e l'accumulo di calcare, si possono implementare cicli di autopulizia automatici:

- Lavaggi periodici delle membrane e dei filtri con acqua purificata o soluzioni disinfettanti.
- Flussaggi regolari per evitare il ristagno idrico.
- Attivazione ciclica delle lampade UV per la sterilizzazione continua dei condotti.
- Sistemi di rigenerazione automatica delle cartucce remineralizzanti.

Queste funzionalità automatizzate non solo riducono la necessità di manutenzione manuale, ma aumentano in modo significativo la sicurezza e la longevità dell'impianto, scongiurando contaminazioni secondarie e preservando la qualità microbiologica anche durante i periodi di inattività prolungata.³⁴

5.3. POSSIBILITA' DI UTILIZZO DELL'ACQUA ESTRATTA

L'acqua è una risorsa essenziale e un potenziale veicolo di contaminazione in ogni fase della filiera agroalimentare. Il "Pacchetto Igiene" europeo stabilisce requisiti rigorosi per la sua gestione, distinguendo la qualità dell'acqua in base al rischio di contatto con il prodotto finale.

5.3.1. QUADRO NORMATIVO

La normativa igienica, in particolare il Regolamento (CE) n. 852/2004 sui principi generali e il Regolamento (CE) n. 853/2004 sulle norme specifiche per gli alimenti di origine animale, stabilisce una chiara gerarchia nella qualità dell'acqua.

- Acqua potabile: definita dal D.Lgs. 18/2023 come “salubre e pulita per il consumo umano” è la categoria di qualità più elevata. I Regolamenti (CE) n. 852/2004 e n. 853/2004 impongono che essa debba soddisfare i requisiti stabiliti dalla legislazione nazionale e UE in materia di acque destinate al consumo umano. L'acqua potabile deve essere priva di microrganismi, parassiti e sostanze in concentrazioni tali da rappresentare un potenziale pericolo per la salute umana.³⁵
- Acqua pulita: Il Regolamento (CE) n. 853/2004 (Allegato III, Sezione VIII) la definisce come "acqua di mare pulita e acqua dolce di qualità analoga". L'acqua di mare pulita è definita come quella "che non contiene microrganismi, sostanze nocive o plancton marino tossico in quantità tali da incidere direttamente o indirettamente sulla qualità sanitaria degli alimenti."³⁶

A seguito di queste definizioni variano gli usi di queste due tipologie di acque.

Deve essere obbligatoriamente potabile l'acqua utilizzata come ingrediente negli alimenti e per tutte le operazioni che implicano il contatto diretto con prodotti alimentari non integri o con superfici a contatto con il cibo e per i servizi igienici (escluso scarico WC).

L'acqua pulita invece ha un uso limitato. Il suo impiego è consentito solo per scopi che non mettono a rischio la salubrità del prodotto finale. Il Regolamento (CE) n. 852/2004, Allegato II, Capitolo VII, stabilisce che l'acqua pulita può essere usata solo se sono garantite strutture e procedure che ne impediscano l'uso come fonte di contaminazione. Può essere usata nell'irrigazione di aree verdi, nel lavaggio di pavimenti in zone non a contatto con prodotti alimentari, nella refrigerazione e produzione di ghiaccio per prodotti ittici interi e anche negli impianti antincendio.

5.3.2. GESTIONE IDRICA E IMPIANTI SEPARATI

Un requisito basilare per garantire l'igiene è la prevenzione della contaminazione crociata. Il Regolamento (CE) n. 852/2004, Allegato II, Capitolo VII, punto 2, impone che:

"Quando l'acqua non potabile è utilizzata, ad esempio per la lotta antincendio, la produzione di vapore, la refrigerazione e per altri scopi analoghi, essa deve passare in condotte separate, debitamente segnalate. Tali condotte non devono essere

raccordate a quelle di acqua potabile e non devono esistere possibilità di riflusso nella rete potabile."

Questo principio di separazione totale si applica a qualsiasi impresa alimentare, dal sito di produzione primaria (agricoltura) ai centri di distribuzione al dettaglio.

5.3.3. CATALOGAZIONE DELL'ACQUA RECUPERATA DA SISTEMI AWG

L'acqua derivante da sistemi AWG non è automaticamente classificabile come "Potabile" o "Pulita". La sua catalogazione dipende unicamente dalla sua qualità finale e dal rispetto dei parametri normativi.

Come vedremo, l'acqua uscente dagli AWG per essere catalogata come acqua potabile deve rispettare costantemente tutti i parametri stabiliti dalla legislazione vigente.

In caso di installazione del sistema AWG nel settore alimentare l'OSA è tenuto a includere il sistema nel proprio piano di autocontrollo (HACCP). Questo richiede un rigoroso programma di campionamento e analisi per dimostrare l'assenza di pericoli (microbiologici, chimici o fisici) e per garantire che i processi di condensazione e i materiali di stoccaggio non introducano contaminanti.

Esempio reale

In un caso studio, condotto a Tel Aviv, gli autori hanno provato a dimostrare che un AWG può produrre acqua potabile sicura rispettando gli standard OMS e locali, anche operando in un contesto urbano complesso e inquinato (traffico, industria, vicinanza al mare).

La spiegazione di questo risultato, apparentemente controintuitivo, risiede nella natura stessa del processo. Il vapore acqueo presente nell'atmosfera, che è la materia prima per l'AWG, è intrinsecamente una frazione "pulita" dell'aria, non contenendo la maggior parte del particolato e dei gas inquinanti.

Nelle macchine AWG il processo di condensazione avviene in un sistema chiuso realizzando di fatto una separazione efficace tra l'acqua e la maggior parte degli inquinanti atmosferici.

Gli autori affermano che l'acqua prodotta, senza alcun sistema di filtrazione o post-trattamento integrato, è risultata quasi sempre pienamente conforme agli standard di potabilità. Solo in rari, isolati casi, alcuni contaminanti (come nichel e benzo[a]pirene) hanno superato temporaneamente i limiti.

Il motivo per cui l'acqua era pulita è che l'AWG non filtra l'aria sporca, ma estrae il vapore acqueo "pulito" in essa contenuto tramite la condensazione, che agisce come un meccanismo di purificazione intrinseco.³⁷

Il caso di Tel Aviv mostra che in determinate condizioni un AWG può produrre acqua di qualità molto elevata anche senza trattamenti aggiuntivi. Tuttavia, i risultati non sono stati confermati in studi successivi, che in diversi contesti hanno rilevato contaminazioni significative. Pertanto, il lavoro va considerato come un esempio di ciò che può accadere in condizioni favorevoli, non di ciò che accade tipicamente. L'assenza di replicabilità limita fortemente la validità esterna dello studio.

6. SISTEMI AWG INTEGRATI

Sulla base delle conoscenze acquisite nello studio degli AWG, sono state analizzate configurazioni utilizzabili in combinazione con gli impianti di climatizzazione per valutare il miglioramento di efficienza degli impianti stessi e la contestuale raccolta di acqua di condensa, ottimizzata mediante AWG.

Gli AWG integrati con sistemi HVAC sono infatti impianti che combinano la produzione di acqua dall'aria con la climatizzazione degli ambienti. Utilizzano l'umidità dell'aria trattata dai sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e condizionamento) per condensarla in acqua sfruttando lo stesso ciclo termodinamico. Gli AWG-HVAC riducono gli sprechi e migliorano l'efficienza complessiva dell'impianto. Inoltre, offrono autonomia idrica e una maggiore sostenibilità ambientale negli edifici.¹⁷

Multifunzionalità del sistema

I sistemi AWG integrati si pongono come una delle soluzioni tecnologicamente più promettenti nell'ambito della sostenibilità applicata alla climatizzazione e al trattamento dell'aria degli edifici. Questi dispositivi sono concepiti come piattaforme polivalenti, in grado di assolvere a molteplici funzioni termodinamiche a partire da un unico input energetico, grazie a un'architettura di ciclo ottimizzata.

Come già menzionato, il fondamento operativo risiede nella condensazione del vapore acqueo atmosferico, ottenuta raffreddando l'aria al di sotto della temperatura di rugiada, un principio comune ai cicli frigoriferi convenzionali.

Tuttavia, l'ingegneria degli AWG integrati è specificamente orientata a recuperare e valorizzare energeticamente i sottoprodotti naturali del ciclo (Figura 7), in particolare il calore che altrimenti verrebbe disperso. Questo design termodinamico avanzato permette di conseguire tre effetti utili simultaneamente:

1. Estrazione di acqua potabile.
2. Raffreddamento e deumidificazione (climatizzazione).
3. Recupero di energia termica secondaria: tramite l'installazione di un condensatore ausiliario a piastre, per esempio, il calore ceduto dal fluido refrigerante può essere trasferito a un circuito idrico tecnico o sanitario. Questo calore può essere efficacemente utilizzato per il preriscaldamento o riscaldamento di acqua destinata a usi domestici o industriali.

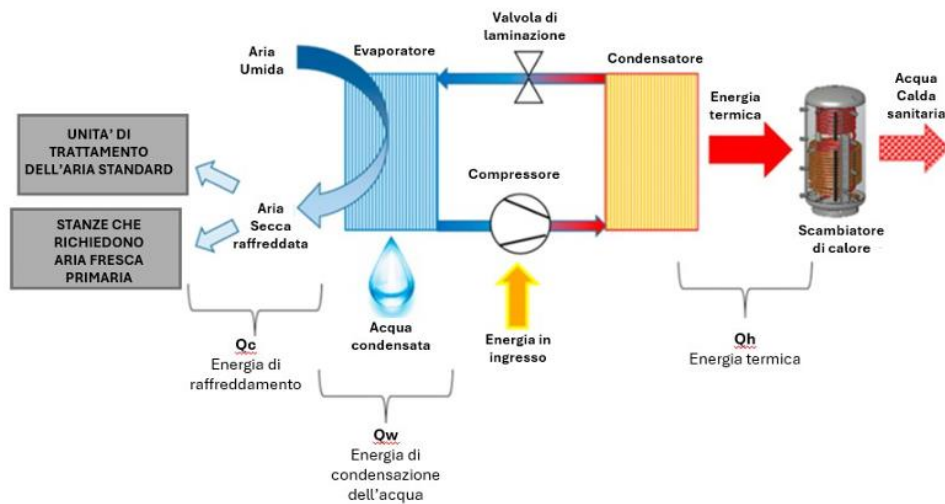


Figura 7 - Schema di AWG avanzato basato su VCRC, in cui gli effetti utili sono espressi in termini di energia - Performance Assessment of Atmospheric Water Generators

Questa sinergia operativa è resa possibile dall'impiego di componenti ad alta efficienza, tra cui scambiatori di calore alettati ottimizzati, compressori inverter e valvole di espansione elettroniche, unitamente a sistemi digitali per la gestione dell'energia. L'intero sistema può essere supervisionato e ottimizzato da una logica di controllo centralizzata (BMS – Building Management System), che modula i flussi termici e i carichi in base alla domanda effettiva.

Secondo uno studio pubblicato su *Energies* (MDPI, 2023), l'integrazione degli AWG negli impianti HVAC di edifici performanti può portare a una riduzione fino al 30% del consumo idrico dalla rete e a un miglioramento del 15–20% dell'efficienza energetica complessiva dell'impianto rispetto alle configurazioni di impianti standard.¹⁷

Vantaggi relativi a sostenibilità ambientale ed efficienza energetica

L'implementazione di sistemi AWG integrati offre un ventaglio di benefici strategici sia sotto il profilo energetico che ecologico.

In primo luogo, si registra un notevole incremento dell'efficienza energetica globale, risultato della capacità di compiere funzionalità multiple (produzione idrica, raffrescamento, riscaldamento) all'interno di un unico ciclo frigorifero. Ciò comporta una diminuzione del fabbisogno elettrico complessivo e una riduzione del carico operativo sui sistemi ausiliari (come caldaie o pompe di calore dedicate all'acqua calda sanitaria).

In secondo luogo, si assiste a un potenziamento della sostenibilità ambientale su due fronti complementari:

1. Riduzione dell'impronta idrica: l'autoproduzione di acqua da una fonte atmosferica riduce la dipendenza dall'acquedotto.
2. Contenimento delle emissioni: si limita la produzione di CO₂ associata sia alla generazione di energia termica che ai processi di approvvigionamento e distribuzione idrica.

L'utilizzo di fluidi refrigeranti a basso GWP (Global Warming Potential), combinato con le tecnologie di recupero termico, supporta inoltre la conformità alle direttive europee sull'efficienza energetica (come la Direttiva 2018/844/UE) e si allinea agli obiettivi di transizione ecologica del Green Deal europeo.

Dal punto di vista applicativo, questi sistemi risultano particolarmente vantaggiosi in climi caldi e umidi, ma anche in edifici ad alta densità di occupazione come ospedali, centri commerciali, scuole; dove la domanda contemporanea di acqua, climatizzazione e ACS (Acqua Calda Sanitaria) è consistente e continua. La possibilità di monitorare in tempo reale i parametri energetici e la qualità dell'acqua prodotta permette un controllo avanzato della qualità dell'aria interna e una gestione ottimizzata delle risorse, fondamentale per l'evoluzione verso lo smart building.

Infine, un'ulteriore ottimizzazione si ottiene combinando questi sistemi con fonti di energia rinnovabile come il fotovoltaico o il solare termico, al fine di massimizzare l'autosufficienza energetica della struttura e ridurre drasticamente i costi operativi a medio-lungo termine.

6.1. INDICATORI PRESTAZIONALI DEGLI AWG

La necessità di indici ed indicatori nasce dal fatto che occorre dare un parametro numerico per poter effettuare analisi e paragoni. Si perde il dettaglio dell'informazione, ma si guadagna la possibilità di avere metriche di confronto.

Alcuni tra gli indicatori proposti in letteratura sono:

1) SEC Specific Energy Consumption

Definito come l'energia di raffreddamento necessaria per condensare un'unità di massa (o volume) di acqua. In pratica quantifica solo l'energia termica (raffreddamento) richiesta per trasformare il vapore in acqua liquida.

$$SEC = \frac{Q_c}{w}$$

Dove:

- Q_c = energia di raffreddamento assorbita [kWh]
- w = massa (o volume) d'acqua prodotta [kg]

È espresso in kWh/kg o kWh/L, include solo il carico termico per la condensazione (es. lavoro del ciclo frigorifero), non include energia per ventilazione, pompe, controllo, ecc.

Il SEC dipende principalmente da temperatura e umidità dell'aria, efficienza termodinamica del sistema (COP del ciclo frigorifero), scambio termico della superficie condensante e dalle perdite termiche.³⁸

2) UPC Unit Power Consumption (o Unit Energy Consumption)

Definito come l'energia totale richiesta dall'AWG per produrre un'unità di volume d'acqua. A differenza del SEC, UPC include tutte le utenze elettriche (compressore, ventilatori, pompe, controlli, eventuali stadi di trattamento).

$$UPC = \frac{E_{tot}}{w}$$

Dove:

- E_{tot} = energia totale consumata dall'unità nell'intervallo [kWh]
- w = massa d'acqua prodotta [kg o L]

Espresso anch'esso in kWh/kg o kWh/L, include l'energia elettrica di tutti i componenti che contribuiscono al consumo.

In generale $UPC \geq SEC$. Tipicamente $UPC = SEC + \text{energia ausiliaria per ventilazione, pompe, controllo, eventuale purificazione}$.³⁹

3) WGR Water Generation Rate

Definito come la massa d'acqua raccolta nell'unità di tempo. Indica la portata di produzione istantanea o media su periodo.

$$WHR = \frac{\Delta w}{\Delta t}$$

Dove:

- Δw = massa d'acqua prodotta durante l'intervallo Δt .

Espresso in kg/h, dipende fortemente dalle condizioni ambientali (umidità relativa, temperatura), area di scambio, capacità del sistema (potenza frigorifera), portata d'aria trattata.³⁹

4) SWP Specific Water Production

Definita come la massa specifica di acqua prodotta per unità di superficie attiva del sistema e per unità di tempo (di solito giorno). Utile per confrontare resa per area di scambio o per footprint del dispositivo.

$$SWP = \frac{w}{A \cdot t}$$

Dove:

- w = massa d'acqua prodotta [kg]
- A = superficie attiva [m²]
- t = tempo [giorno]

Espresso in kg/(day·m²), mostra l'efficienza di produzione in funzione della superficie impiegata, risulta molto utile per sistemi passivi o ibridi dove la superficie (es. materiale sorbente, radiatori) è il parametro limitante.⁴⁰

WHR e SWP servono scopi diversi; WHR misura la portata assoluta (quanto esce), SWP la normalizza rispetto all'area occupata (utile per valutare compattezza o soluzioni passive/adsorbenti).

Si noti che questi parametri vengono utilizzati sia in riferimento alla massa che al volume di acqua prodotta.

Rimane di essenziale importanza considerare delle condizioni standard per confrontare i vari dispositivi. Risulta determinante dichiarare le condizioni di prova (es.: 27 °C, 60 % RH, portata d'aria x m³/h) perché le prestazioni variano fortemente con temperatura/UR.

6.2. ALCUNI INDICATORI PROPOSTI IN TEMPI RECENTI

Tra gli indicatori per valutare l'efficienza energetica meritano particolare attenzione il WET, COP e il MRE.

Water Energy Transformation

Il WET misura il rapporto tra l'acqua estratta, in termini di energia di condensazione, e l'energia richiesta dalla macchina per fornire tale effetto utile.

Rappresenta il rapporto tra l'effetto utile voluto, l'acqua condensata trasformata in energia tramite l'energia specifica di condensazione, e l'energia spesa per ottenerla.

Il WET quantifica quanto efficacemente il sistema trasforma l'energia immessa in acqua, normalizzando il processo rispetto all'energia di condensazione dell'acqua. Risulta essere adimensionale.⁴¹

Può essere calcolato con la seguente formula:

$$WET = \frac{w * Q_{cond}}{en} = \frac{Q_w}{en}$$

Dove:

- w = acqua prodotta [kg]
- Q_{cond} = energia specifica di condensazione [kJ]
- En = consumo dell'intero AWG escluso trattamento acqua
- Q_w = energia teorica utile ottenuta dalla condensazione [kJ]

Coefficient Of Performance

Il COP è un parametro termodinamico largamente usato nelle macchine frigorifere/pompe di calore. Esprime il rapporto tra l'effetto termico utile (calore rimosso o fornito) e l'energia di lavoro spesa.

Per un ciclo frigorifero, il COP si definisce come:

$$COP = \frac{Q_{cold}}{W_{input}}$$

Dove:

- Q_{cold} = potenza utile frigorifera, cioè la quantità di calore che il sistema sottrae all'aria per condensarla [kW];
- W_{input} = potenza assorbita, cioè l'energia elettrica fornita al compressore (o ad altri componenti attivi) [kW].

Considerando un AWG basato su condensazione attiva, il ciclo frigorifero è essenziale per raffreddare l'aria al di sotto del punto di rugiada e condensare l'umidità in acqua. Il COP misura quanto efficientemente il compressore/il ciclo frigorifero riesce a produrre questo raffreddamento utile rispetto all'energia spesa.

Più alto è il COP, meno energia elettrica è necessaria per creare il gradiente di temperatura che induce la condensazione.

Un COP elevato contribuisce a ridurre il consumo energetico complessivo e quindi il costo per litro d'acqua (riducendo ad esempio il SEC).

In alcuni studi su AWG sperimentali è stato riportato un COP massimo intorno a 4 per sistemi ottimizzati.⁴²

Il COP dipende molto dalle condizioni operative, in particolare dalle temperature di evaporazione e condensazione. Le perdite nei componenti (scambiatori, compressore, tubazioni) riducono il COP reale rispetto al limite teorico.

Moisture Removal Efficiency e Moisture Harvesting Index

Il MRE indica l'efficienza con cui il sistema rimuove il vapore d'acqua dall'aria rispetto all'energia impiegata.

Per un sistema AWG, il Moisture Removal Efficiency ha una grande importanza perché permette di valutare l'efficienza del processo di estrazione del vapore, prima ancora che avvenga la condensazione vera e propria. È utile quando si confrontano sistemi che non si basano solo sulla condensazione, ma anche su metodi di deumidificazione più leggera, come i deumidificatori adsorbenti o a desiccanti, dove il costo energetico per rimuovere umidità può essere tipicamente minore.

Sebbene non esista un'unica formula universalmente utilizzata per tutti gli AWG, una formulazione generica ispirata al concetto di MRE (deumidificazione) è:

$$MRE = \frac{m_{\text{vapore rimosso}}}{E_{\text{totale}}}$$

Dove:

- $m_{\text{vapore rimosso}}$ = massa di vapore d'acqua estratta dall'aria in un dato periodo [kg]
- E_{totale} = energia totale consumata dal sistema durante lo stesso intervallo [kW]

Questo indice dipende molto dalle condizioni di ingresso (temperatura, umidità dell'aria, portata d'aria) per questo motivo valori in laboratorio possono essere diversi da quelli reali.⁴³

Alcuni studi su AWG definiscono efficienze di raccolta dell'umidità in base a modelli termodinamici specifici. Ad esempio, in un lavoro recente su sistemi AWG, è stato definito un indice MHI (Moisture Harvesting Index) così:

$$MHI = \frac{q_l}{q_t} = \frac{w_i - w_o}{h_i - h_o + h_{fg}}$$

Dove:

- q_l = calore latente, la quota di calore scambiata legata esclusivamente alla condensazione dell'acqua [kJ/kg]
- q_t = calore totale, il calore totale richiesto o scambiato dal sistema [kJ/kg]

- w_i = rapporto di umidità in entrata, la quantità di vapore acqueo presente nell'aria prima di entrare nella macchina [$\text{kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{aria secca}}$]
- w_o = rapporto di umidità in uscita, la quantità di vapore residuo nell'aria dopo che l'acqua è stata estratta [$\text{kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{aria secca}}$]
- h_i = entalpia specifica in entrata, l'energia totale contenuta nell'aria umida in ingresso [$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{aria secca}}$]
- h_o = entalpia specifica in uscita, l'energia residua nell'aria dopo il processo di raffreddamento/deumidificazione [$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{aria secca}}$]
- h_{fg} = valore latente di vaporizzazione, l'energia necessaria per far cambiare fase all'acqua (da vapore a liquido) [$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{acqua}}$] ⁴⁴

Questo tipo di espressione è utile specialmente in modelli più complessi.

Indicatori per sistemi integrati e ibridi

L'integrazione della tecnologia AWG nei moderni sistemi HVAC ha aumentato significativamente la complessità di queste macchine, che oggi non assolvono più un'unica funzione, ma operano in modalità multifunzionale simultanea.

Di conseguenza, le metriche tradizionali di efficienza energetica, limitate alla valutazione dei singoli processi isolati, risultano ormai obsolete. Si è resa quindi necessaria l'adozione di nuovi strumenti capaci di quantificare le prestazioni globali e di garantire un confronto oggettivo tra architetture diverse; a tale scopo, sono stati introdotti due distinti indici prestazionali.

Indice di valutazione globale

Nel 2022 è stato introdotto il GEI per dare una misura sintetica dell'efficienza di queste macchine "tutto in uno". Il GEI funziona essenzialmente premiando la simultaneità: calcola l'efficienza di ogni servizio utile offerto e moltiplica per quanti servizi sono prodotti nello stesso momento, con la stessa energia in ingresso.²²

Matematicamente può essere espresso in questo modo:

$$\text{GEI} = \sum_{i=1}^n (E_i) \cdot Id$$

Dove:

- E_i è l'efficienza dell'effetto utile,
- Id è il grado di integrazione (numero di effetti prodotti contemporaneamente).

Il GEI, però, è limitato. Funziona bene per confrontare sistemi che sono nati come unità compatte e completamente integrate, ma non considera in modo appropriato tutti gli aspetti quando si tratta di valutare i sistemi ibridi, cioè quelli composti da un mix di tecnologie avanzate e vecchi componenti (ad esempio, una nuova macchina AWG accoppiata a una caldaia tradizionale).

Indice di valutazione globale avanzato

Per rendere più generale l'applicazione di un indice a più tipologie di sistemi e più configurazioni, è stato sviluppato l'AGEI. Questo indice rappresenta un passo avanti perché è progettato per considerare anche i sistemi eterogenei e ibridi.

Esso presenta dei vantaggi può essere applicato a qualsiasi tipo di impianto, nuovo o modificato, senza richiedere un design standard e permette ai progettisti di assegnare un peso diverso a ciascun servizio (ad esempio, dare più importanza al raffreddamento in un clima caldo) in base a obiettivi specifici (economici, ambientali o energetici).

L'AGEI si è dimostrato più accurato del GEI nel rappresentare l'efficienza effettiva, specialmente quando un impianto usa contemporaneamente sia la tecnologia avanzata che le soluzioni convenzionali.²²

Matematicamente può essere espresso in questo modo:

$$AGEI = \frac{n}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{u_j} \frac{E_{ij}}{f_j}$$

Dove:

- n è il numero totale di effetti utili prodotti dal sistema (es. riscaldamento, raffreddamento, condensazione, ecc.),
- m è il numero di macchine indipendenti che compongono il sistema complessivo.
- E_{ij} rappresenta l'indicatore di efficienza della j -esima macchina, la quale fornisce simultaneamente i -esimi effetti utili, come ad esempio riscaldamento e raffrescamento.
- f_j rappresenta il fattore di conversione energetico utilizzato per esprimere le grandezze energetiche in termini di energia primaria.

È importante sottolineare che, per mantenere trasparenza e tracciabilità, l'AGEI richiede che siano esplicitati gli indicatori di efficienza tecnica utilizzati.

L'AGEI è uno strumento di supporto essenziale sia in progettazione dove aiuta a scegliere tra diverse configurazioni impiantistiche prima che vengano realizzate sia in esercizio dove serve a monitorare le prestazioni reali e a guidare gli interventi di ottimizzazione.

Per calcolare l'AGEI, si parte dagli indicatori di efficienza specifici per ciascuna funzione, come:

- COP (per l'efficienza del riscaldamento a pompa di calore).
- EER (per l'efficienza del raffreddamento).
- WET (per l'efficienza nella produzione di acqua dall'aria).
- η (per l'efficienza della caldaia tradizionale).

L'AGEI è quindi la metrica di riferimento che permette di fare una valutazione unica, trasparente e confrontabile, superando i limiti di un'analisi parziale.

6.3. AWG IN COMMERCIO

Sono molte le macchine AWG in commercio e in generale possono essere distinte in base alla portata di acqua prodotta e alla loro dimensione. Si riassume qui di seguito una suddivisione fatta con dati reali presi da diversi cataloghi di produttori (Watergen⁴⁵, Aguaer⁴⁶, HuProTec⁴⁷).

Macchine ad uso residenziale

Le macchine residenziali presentano dimensioni e peso ridotte, spesso sono fornite di piccoli serbatoi, non hanno bisogno di impianti separati basta la corrente elettrica e spazio per il raffreddamento (30 cm).

Hanno una produzione che va da 20 fino a circa 30 litri/giorno con funzionamento possibile a partire da circa 18°C e umidità relativa circa del 20% in su, fino a 40°C.

Presentano valori di efficienza energetica nell'ordine di 0,3–0,7 kWh per litro in condizioni standard (26,7°C / 60% RH). Valori che comprendono anche la fase di potabilizzazione in quanto queste macchine presentano filtri al loro interno.

Macchine ad uso commerciale o edifici multipli

Più grandi di quelle ad uso residenziale hanno dimensioni molto variabili in base alla produzione richiesta che varia da 100 a 500 litri/giorno con funzionamento possibile a partire da circa 15°C e umidità relativa circa del 20% in su, fino a 43°C come nel caso precedente.

Presentano valori di efficienza energetica nell'ordine di 1 – 6 kWh per litro in condizioni standard (26,7°C / 60% RH). Valori che comprendono anche la fase di potabilizzazione in quanto queste macchine presentano filtri al loro interno.

Il loro utilizzo ideale è in piccoli negozi, area residenziale condivisa, università, dove serve qualche centinaio di litri al giorno.

Macchine ad uso industriale o comunitario

Anche queste hanno dimensioni molto variabili in base alla produzione richiesta che varia da 1000 a 6000 litri/giorno con funzionamento possibile a partire da circa 20°C e umidità relativa da circa il 20% in su, fino a circa 45°C.

Presentano valori di efficienza energetica nell'ordine di 0,35 – 6 kWh per litro in base al modello e alla dimensione, in condizioni standard (26,7°C / 60% RH). Valori che comprendono anche la fase di potabilizzazione in quanto queste macchine presentano filtri al loro interno.

Queste macchine presentano un grande divario di produzione in base alle condizioni climatiche, come esempio possiamo prendere i dati della macchina “HPT600 High Efficiency Atmospheric Water Generator” della casa “HuProTec” che da specifiche tecniche ha una capacità produttiva di 1600 litri/giorno a 30°C e RH 80% ma che testata in diverse condizioni ha riportato i seguenti dati:

- Produzione di 600 litri/giorno di acqua potabile con 27°C e RH 60%
- Produzione di 1000 litri/giorno di acqua potabile con 30°C e RH 80%

- Produzione di 135 litri/giorno di acqua potabile con 15°C e RH 40%

Il loro utilizzo ideale è comunità rurali, strutture alberghiere, impianti agricoli, edifici multipiano.

Criteri di scelta delle AWG

Per scegliere la macchina più adatta al caso specifico occorre valutare diversi aspetti ambientali e fisici oltre agli indicatori prestazionali, tra cui:

1) Intervallo climatico di lavoro

Come visto in precedenza l'efficacia dell'AWG dipende fortemente dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità relativa, flusso d'aria). È essenziale verificare per quali condizioni è progettato l'apparecchio.

In climi con bassa umidità o temperature molto basse, la condensazione dell'umidità nell'aria può diventare poco efficace o richiedere un consumo energetico eccessivo e i sistemi passivi hanno funzionalità molto limitate e richiedono alta umidità.

Vengono prima visionate le mappe climatiche del sito di installazione in cui si possono trovare informazioni sulla quantità di umidità relativa e la temperatura media giornaliera per capire se l'apparecchio è dimensionato per quelle condizioni.⁴⁸

Quando si installa in Italia o in Europa, bisogna valutare le condizioni invernali (temperatura bassa, umidità variabile) e le condizioni estive con alte temperature per verificare se la macchina mantiene una buona produzione anche in condizioni non ottimali.

2) Produzione giornaliera nelle diverse condizioni

Di primaria importanza sono i litri di acqua che può produrre la macchina al giorno, e come questa produzione varia al variare della temperatura e dell'umidità.

I produttori spesso dichiarano valori ottimistici ma queste cifre sono in genere riferite a condizioni ideali (es. alta umidità, temperatura elevata). Per dimensionare correttamente l'impianto (quante macchine, serbatoi), occorre stimare la resa reale e la variazione nel corso dell'anno, valutando il numero e la dimensione di serbatoi di accumulo per gestire le variazioni giornaliere o stagionali.³⁸

3) Dimensioni di ingombro

Lo spazio fisico che la macchina e i suoi componenti richiedono (inclusi ventilazione, accesso per manutenzione, serbatoio acqua, tubazioni, ecc.).

Le macchine di estrazione dell'acqua dall'aria richiedono flusso d'aria, ventilazione, spesso spazio attorno per la dissipazione del calore o la diffusione dell'aria in uscita, uno spazio limitato può tradursi in aumento dei costi o in resa inferiore se l'installazione non consente le condizioni corrette. Occorre quindi considerare anche lo spazio per i serbatoi di acqua prodotta, sistemi di trattamento acqua, tubazioni e scarico dell'aria.

Importante è quindi la posizione ideale, ad esempio in locale tecnico, all'esterno, oppure integrato in area interna con le giuste precauzioni (un volume d'aria sufficiente, un ricambio d'aria costante o uno scarico d'aria calda all'esterno).²²

4) Utilizzo dell'acqua prodotta

L'acqua generata dalla macchina deve essere sicura (chimicamente e microbiologicamente), potabile se necessario, e conforme alle normative/obiettivi previsti. Quindi in base alla destinazione che verrà fatta dell'acqua generata si avranno esigenze diverse e varie fasi di post estrazione.

5) Manutenzione

Importante per mantenere alti volumi qualitativi e quantitativi di acqua prodotta è quanto spesso e con quale complessità occorre intervenire sull'impianto: filtri, serbatoi, drenaggi, controlli, eventuali interventi tecnici.

Un impianto con una buona resa, ma che richiede una manutenzione frequente o complessa, può risultare poco sostenibile. Gran parte degli impatti ambientali e dei costi delle AWG derivano infatti dalla fase operativa e da quella di manutenzione.

Prima dell'installazione bisogna verificare quali componenti richiedono sostituzione periodica e costi associati, in base a questo si studia anche la posizione migliore per la macchina.⁴⁹

6) Potenza richiesta

Con potenza richiesta si intende il consumo elettrico necessario per far funzionare l'AWG e come questo impatti sui costi operativi.

Il consumo energetico può essere elevato, e l'efficienza (kWh per litro d'acqua prodotta) è un parametro essenziale. In progetti con vincoli di potenza elettrica, oppure se si considera alimentazione da fonti rinnovabili o off-grid, bisogna valutare l'impatto sul quadro elettrico e dimensionare l'impianto correttamente.

Un impianto poco efficiente può rendere la produzione di acqua costosa o non competitiva rispetto ad altre soluzioni. Per questo bisogna stimare i costi operativi annuali: consumo elettrico × tariffa locale, e confronto con alternative.³⁸

6.4. INDICI PRESTAZIONALI

Gli indici prestazionali aziendali, comunemente definiti come Key Performance Indicators (KPI), costituiscono un elemento indispensabile per la valutazione della salute e dell'efficienza di un'impresa. Essi rappresentano non solo uno strumento interno di controllo e miglioramento, ma anche un fattore determinante per l'accesso a programmi di incentivazione pubblica e per la valorizzazione del profilo competitivo sul mercato.

Funzione degli indici prestazionali

Secondo la norma UNI EN 16231:2013⁵⁰ e le linee guida ISO 14031:2013⁵¹, gli indicatori di prestazione permettono di valutare la performance gestionale, economica e ambientale di un'organizzazione attraverso parametri oggettivi.

Essi forniscono un quadro sintetico dello stato dell'impresa in relazione a diversi ambiti:

- Economico-finanziario (es. ROI, ROE, margine operativo lordo, flusso di cassa).
- Produttivo (es. rendimento degli impianti, tasso di utilizzo delle risorse, produttività del lavoro).
- Energetico e ambientale (es. efficienza energetica, intensità di emissioni, consumo idrico per unità di prodotto).
- Sociale e organizzativo (es. sicurezza, formazione, turnover del personale).

La funzione primaria di tali indici è di orientare le decisioni strategiche e di supportare l'ottimizzazione dei processi aziendali, individuando le aree critiche e i margini di miglioramento continuo.

Calcolo e interpretazione

Un indice prestazionale è generalmente espresso come rapporto tra un risultato ottenuto e una risorsa impiegata.

Ad esempio:

$$\text{Indice di produttività} = \frac{\text{Output prodotto}}{\text{Input di risorse (ore, materie, energia)}}$$

$$\text{Indice di efficienza energetica} = \frac{\text{Energia utile prodotta}}{\text{Energia totale consumata}}$$

$$\text{Water efficiency} = \frac{\text{m}^3 \text{ di acqua recuperata o prodotta}}{\text{m}^3 \text{ di acqua consumata}}$$

Valori più elevati indicano una maggior efficienza operativa e una gestione ottimizzata delle risorse, mentre valori bassi segnalano inefficienze o dispersioni energetiche e produttive.

Benefici derivanti

Avere indici prestazionali alti porta diversi vantaggi competitivi. Gli indicatori elevati migliorano la trasparenza gestionale e la capacità di pianificazione strategica, consentono di ottimizzare tempi, costi e risorse riducendo sprechi e migliorando la produttività.

Un miglioramento degli indicatori ambientali rafforza la reputazione e la conformità alle direttive europee sulla rendicontazione di sostenibilità.⁵²

Una gestione prestazionale solida aumenta l'affidabilità nei confronti di investitori e istituti di credito perchè le imprese con KPI elevati mostrano maggiore capacità di adattamento e innovazione nel lungo periodo.

Indici prestazionali e incentivi pubblici

In Italia, il possesso di indici prestazionali elevati non costituisce di per sé un requisito automatico per ottenere finanziamenti pubblici, ma rappresenta un elemento premiante nei programmi di sostegno alla produttività e all'innovazione.

Le imprese che dimostrano elevata efficienza, solidità economica e capacità gestionale risultano infatti più idonee a partecipare ai principali strumenti agevolati, tra cui incentivi per l'acquisto di macchinari, impianti e tecnologie produttive avanzate; crediti d'imposta per investimenti in digitalizzazione, automazione, efficienza energetica e sostenibilità. A queste aziende vengono anche dati finanziamenti agevolati per progetti di innovazione, ricerca e sviluppo tecnologico.⁵³

Influenza delle macchine AWG sugli indici prestazionali

L'introduzione di macchine AWG può incidere in modo rilevante sui KPI aziendali, grazie alla riduzione del prelievo da falde e reti pubbliche con un miglioramento dell'indice di efficienza idrica e del bilancio ambientale. Se questi sistemi vengono integrati con impianti fotovoltaici o sistemi di recupero termico, migliorano l'indice di efficienza energetica complessiva.

L'investimento iniziale può incidere temporaneamente sulla redditività, ma nel medio periodo i costi operativi si riducono grazie al risparmio idrico e l'adozione di queste tecnologie è percepita come scelta innovativa e sostenibile, migliorando la reputazione d'impresa e i parametri ESG (Environmental Social Governance).

L'adozione di tecnologie innovative come gli impianti AWG contribuisce a migliorare diversi indicatori rendendo l'impresa più performante e coerente con i criteri di transizione ecologica promossi dalle politiche europee e nazionali.

6.5. AWG NELLE RIQUALIFICAZIONI ENERGETICHE

Negli ultimi anni l'interesse verso le tecnologie di estrazione d'acqua atmosferica è cresciuto notevolmente, anche in relazione ai progetti di riqualificazione energetica degli edifici.

L'idea di integrare gli AWG in un progetto di efficientamento energetico è affascinante poiché unisce due obiettivi centrali della sostenibilità edilizia: l'autonomia idrica e la valorizzazione dell'energia in un'ottica di economia circolare.

Vantaggi

Le macchine AWG, come già descritto, offrono una serie di vantaggi tecnici e ambientali che, in determinate condizioni, possono rendere la loro adozione conveniente.

In primo luogo, la produzione di acqua dall'aria permette di ridurre la dipendenza dall'acquedotto e di limitare i costi di trasporto o approvvigionamento idrico, un aspetto rilevante per strutture isolate, alberghi, ospedali e centri commerciali e sportivi.

Un ulteriore aspetto positivo riguarda la sinergia energetica; durante il processo di condensazione l'AWG sottrae calore all'aria, contribuendo alla deumidificazione e al raffrescamento degli ambienti, e può essere integrato nel ciclo termico di pompe di calore o impianti HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning).

Alcuni studi recenti mostrano come l'integrazione AWG–HVAC consenta di recuperare parte dell'energia termica prodotta, riducendo il consumo complessivo di energia primaria e migliorando il comfort termoigrometrico dell'edificio.¹⁷

Limiti e criticità

Nonostante le potenzialità, la convenienza degli AWG è fortemente condizionata da fattori climatici, impiantistici ed economici.

Il rendimento del sistema dipende principalmente da temperatura e umidità relativa dell'aria, la produzione ottimale si ottiene in condizioni calde e umide ($T > 20\text{ °C}$, $UR > 60\%$), mentre in climi temperati o freddi la resa può ridursi drasticamente. Nel contesto italiano, ciò significa che le prestazioni risultano elevate nelle aree costiere o meridionali, ma modeste nelle regioni del Nord caratterizzate da inverni lunghi e aria secca.

Dal punto di vista energetico, il consumo elettrico varia tra 0,3 e 0,7 kWh per litro d'acqua prodotta in condizioni favorevoli. Tale valore può peggiorare sensibilmente in ambienti meno umidi, influenzando i costi operativi. Per questo motivo, l'adozione dell'AWG risulta più sostenibile se alimentata da fonti rinnovabili (ad esempio da un impianto fotovoltaico) o se integrata in un sistema che recupera il calore o il freddo generato nel processo di condensazione.

Anche la manutenzione e il trattamento dell'acqua richiedono attenzione: filtri, lampade UV e controlli igienico-sanitari incidono sul costo complessivo e vanno considerati nella valutazione economica.²²

Confronto con le soluzioni tradizionali

Nel quadro della riqualificazione energetica, le soluzioni più diffuse; come coibentazione dell'involucro, sostituzione degli infissi, pompe di calore ad alta efficienza, ventilazione meccanica controllata (VMC) e impianti fotovoltaici; presentano rendimenti consolidati, incentivi fiscali dedicati e tempi di ritorno economico ben definiti. Gli AWG, invece, si collocano ancora in una fase di diffusione limitata, con applicazioni di nicchia e una maggiore incertezza sui tempi di pay-back.

Tuttavia, quando il progetto prevede anche la riqualificazione impiantistica profonda, l'inserimento di un sistema AWG può offrire un vantaggio competitivo, soprattutto se integrato con l'impianto HVAC e con sistemi di gestione energetica intelligente.

Il loro contributo non va quindi valutato solo in termini di risparmio economico immediato, ma anche come investimento in sostenibilità, resilienza e indipendenza idrica; quindi l'integrazione di un generatore d'acqua atmosferico in un intervento di riqualificazione energetica non è sempre economicamente vantaggiosa, ma può diventarlo quando la resa idrica è elevata, l'energia elettrica è rinnovabile o recuperata, e l'impianto è progettato in modo sinergico con le altre componenti energetiche dell'edificio.

In tali scenari, l'AWG non è soltanto un sistema di produzione d'acqua, ma un elemento strategico per la transizione verso edifici autosufficienti, resilienti e sostenibili, capaci di gestire in modo intelligente sia l'energia sia le risorse idriche.

6.6. FUNZIONAMENTO E RUOLO DELLE UNITA' DI TRATTAMENTO ARIA

La purezza dell'acqua generata dai sistemi AWG (Atmospheric Water Generator) dipende in modo diretto dalla qualità dell'aria da cui l'umidità viene estratta. Poiché l'AWG condensa il vapore acqueo atmosferico, ogni particella, gas o contaminante presente nell'aria può depositarsi sulla superficie di condensazione e quindi trovarsi, almeno in tracce, nell'acqua prodotta.

Per questo motivo, l'integrazione di un sistema AWG con una UTA (Unità di Trattamento Aria) rappresenta una soluzione tecnologica ottimale per ottenere acqua di maggiore purezza e stabilità microbiologica.

Funzionamento delle UTA

Le Unità di Trattamento Aria (Figura 8) sono dispositivi centrali negli impianti di climatizzazione e ventilazione, progettati per:

- Filtrare l'aria attraverso prefiltri e filtri ad alta efficienza (F7–F9, HEPA, a carboni attivi).
- Controllare la temperatura e l'umidità relativa.
- Eliminare microparticelle, VOC (composti organici volatili), pollini e cariche batteriche⁵⁴.
- In alcuni casi, sterilizzare l'aria con raggi UV-C o ionizzazione bipolare.

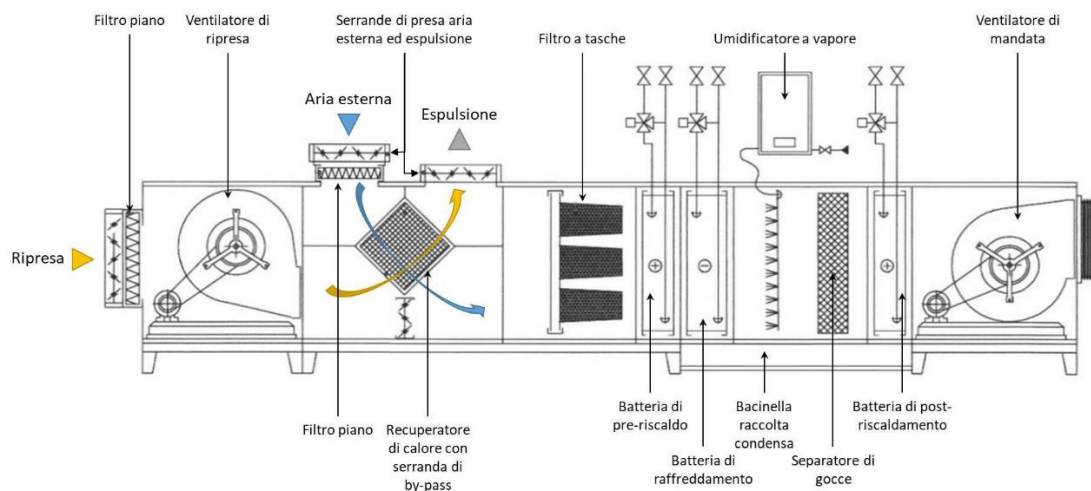


Figura 8 – Schema UTA - Ingenio

L'impiego dell'aria trattata da una UTA come sorgente di umidità per un sistema AWG comporta numerosi vantaggi tecnici. Grazie alla filtrazione multistadio, vengono quasi totalmente rimossi i particolati PM2.5 e PM10, prevenendo il deposito di impurità solide nell'acqua prodotta. Inoltre, l'utilizzo di aria priva di spore e batteri minimizza il rischio di proliferazioni nel circuito di condensazione, garantendo una maggiore stabilità chimica al sistema. L'integrazione tra AWG e UTA risulta particolarmente efficace in contesti urbani o industriali, dove l'aria ambiente presenta spesso elevate concentrazioni di inquinanti.

L'utilizzo di sistemi UTA riduce la necessità di trattamenti successivi (UV, ozono, remineralizzazione) assicurando costanza qualitativa dell'acqua anche in condizioni ambientali variabili e aumenta la durata operativa dei componenti del sistema AWG.

Le UTA possono essere impiegate anche a valle delle macchine AWG per gestire l'aria in uscita. Quest'ultima, risultando già deumidificata e raffreddata, può essere immessa direttamente negli ambienti come flusso d'aria primario. Grazie al controllo dei parametri termoigrometrici, tale processo contribuisce in modo significativo al miglioramento del comfort interno

6.7. IL FUTURO DELLE MACCHINE AWG

Negli ultimi anni le macchine per l'estrazione d'acqua atmosferica hanno conosciuto un'evoluzione significativa, spinta dalla crescente pressione esercitata dai cambiamenti climatici e dalla scarsità idrica globale. Queste tecnologie si stanno progressivamente affermando come una delle soluzioni più promettenti per la produzione decentralizzata di acqua potabile, soprattutto in contesti aridi o isolati, dove le fonti convenzionali risultano insufficienti o contaminate. La loro diffusione è ancora limitata da vincoli energetici ed economici, ma la traiettoria evolutiva attuale mostra una direzione chiara verso sistemi più efficienti, sostenibili e intelligenti.

Miglioramento dell'efficienza operativa

Il primo elemento di sviluppo riguarda l'efficienza energetica. Le tecnologie AWG basate su condensazione, che rappresentano la forma più diffusa e matura, soffrono tuttora di un fabbisogno energetico elevato, in particolare nelle fasi di raffreddamento e compressione. Le prospettive future indicano tuttavia una riduzione sensibile dei consumi grazie a innovazioni nei cicli termodinamici, nell'impiego di compressori a basso assorbimento e nel recupero del calore latente di condensazione. A ciò si aggiunge la tendenza, già in corso, a integrare fonti rinnovabili, in particolare l'energia solare fotovoltaica ed eolica, rendendo i sistemi parzialmente o totalmente indipendenti dalla rete elettrica. L'evoluzione va dunque nella direzione di AWG ibridi e autonomi, capaci di operare in modo sostenibile anche in aree prive di infrastrutture energetiche affidabili.⁵⁵

Evoluzione verso materiali adsorbenti di nuova generazione (MOF)

La ricerca sui materiali assorbenti sta aprendo prospettive del tutto nuove. La prossima generazione di macchine AWG sarà fortemente basata su materiali avanzati, in particolare sui Metal-Organic Frameworks (MOF), reti metallico-organiche caratterizzate da una porosità estremamente elevata e da una capacità di adsorbire e rilasciare vapore acqueo anche in condizioni di umidità molto bassa. Rispetto ai materiali tradizionali, come gel di silice o zeoliti, i MOF mostrano un comportamento nettamente superiore in termini di capacità di raccolta, velocità di adsorbimento e stabilità ciclica. Inoltre, possono essere rigenerati a temperature contenute (40–70 °C), consentendo l'impiego di fonti termiche a bassa intensità, come la radiazione solare.

Un aspetto particolarmente innovativo riguarda l'applicazione dell'intelligenza artificiale e del machine learning alla progettazione dei MOF. La combinazione di

algoritmi predittivi e grandi database di strutture note sta consentendo di individuare con rapidità materiali capaci di ottimizzare simultaneamente più parametri prestazionali come capacità di adsorbimento, cinetica di scambio, stabilità idrolitica ed efficienza energetica, superando i limiti dei metodi sperimentali tradizionali, basati su tentativi successivi. In questo modo si prospetta una nuova generazione di materiali intelligenti, progettati digitalmente e adattabili alle diverse condizioni climatiche di utilizzo.⁵⁶

Sfide e futuro

Rimangono tuttavia alcune sfide significative. Il costo iniziale di installazione e manutenzione costituisce ancora una barriera all'adozione su larga scala, specialmente nei paesi a basso reddito.

Sul piano dei materiali, la durabilità dei desiccanti (gel di silice, zeoliti o sali igroscopici (CaCl₂, LiCl)) e la loro stabilità in ambienti estremi restano oggetto di intensa sperimentazione.

Anche la dipendenza dalle condizioni climatiche locali rappresenta un limite operativo che richiede ulteriori soluzioni tecniche, come l'integrazione di cicli ibridi; ossia la combinazione di più principi di funzionamento (es. condensazione + assorbimento), questi sistemi uniscono i vantaggi di più tecnologie:

- Il ciclo a condensazione permette di produrre acqua rapidamente in condizioni di umidità medio-alta.
- Il ciclo a desiccante garantisce operatività anche in condizioni di bassa umidità.

Questo approccio rende il sistema più versatile, efficiente e continuo, riducendo i tempi di inattività e ampliando la gamma climatica di funzionamento.

Nonostante queste criticità, le tendenze convergono verso un futuro in cui le macchine AWG diverranno parte integrante delle strategie di resilienza idrica urbana e rurale. Entro il prossimo decennio, la combinazione tra nuove architetture di sistema, materiali intelligenti e algoritmi di ottimizzazione consentirà di sviluppare dispositivi in grado di funzionare efficacemente anche in aree desertiche o a bassissima umidità, con consumi energetici ridotti e costi di esercizio sempre più competitivi. Gli AWG evolveranno da soluzioni emergenziali a strumenti permanenti di gestione sostenibile delle risorse idriche, configurandosi come un tassello fondamentale nella transizione verso una economia dell'acqua decentralizzata e autonoma, sostenuta da tecnologie digitali e materiali avanzati.

7. DEFINIZIONE E INQUADRAMENTO DELLA GRANDE DISTRIBUZIONE ORGANIZZATA

La Grande Distribuzione Organizzata (GDO) rappresenta l'insieme delle imprese commerciali che operano attraverso reti di punti vendita caratterizzati da dimensioni medio-grandi, gestione centralizzata degli acquisti e standardizzazione dei format distributivi. La GDO rappresenta un elemento fondamentale del tessuto distributivo italiano, tanto da raggiungere oltre 23.850 punti vendita mappati nel 2025.⁵⁷ Secondo la definizione del Ministero delle Imprese e del Made in Italy⁵⁸, la GDO comprende

supermercati, ipermercati e grandi superfici specializzate, organizzate sotto un'unica insegna e coordinate da strutture societarie complesse. Questa suddivisione viene creata sulla base delle attuali definizioni:

- **GRANDE MAGAZZINO:** esercizio al dettaglio operante nel campo non alimentare, organizzato prevalentemente a libero servizio, che dispone di una superficie di vendita uguale o superiore a 400 m² e di un assortimento di prodotti, in massima parte di largo consumo, appartenenti a differenti merceologie, generalmente suddivisi in reparti.
- **SUPERMERCATO:** esercizio al dettaglio operante nel campo alimentare, organizzato prevalentemente a libero servizio e con pagamento all'uscita, che dispone di una superficie di vendita uguale o superiore a 400 m² e di un vasto assortimento di prodotti di largo consumo ed in massima parte preconfezionati nonché, eventualmente, di alcuni articoli non alimentari di uso domestico corrente.
- **IPERMERCATO:** esercizio al dettaglio con superficie di vendita superiore a 2.500 m², suddiviso in reparti (alimentare e non alimentare), ciascuno dei quali aventi, rispettivamente, le caratteristiche di supermercato e di grande magazzino.
- **MINIMERCATO:** esercizio al dettaglio in sede fissa operante nel campo alimentare con una superficie di vendita che varia tra 200 e 399 m² e che presenta le medesime caratteristiche del supermercato.
- **GRANDE SUPERFICIE SPECIALIZZATA:** esercizio al dettaglio operante nel settore non alimentare (spesso appartenente ad una catena distributiva a succursali) che tratta in modo esclusivo o prevalente una specifica gamma merceologica di prodotti su una superficie di vendita non inferiore ai 1.500 m².

Nel contesto della presente tesi, l'attenzione è rivolta esclusivamente al comparto alimentare, e in particolare al supermercato, inteso come punto vendita con superficie generalmente compresa tra 400 e 2.500 m², dedicato prevalentemente alla vendita di prodotti alimentari e di largo consumo, con presenza di reparti freschi e refrigerati; esso rappresenta circa il 76% delle insegne totali del sistema distributivo analizzato. L'ipermercato, pur appartenendo alla stessa categoria distributiva, si distingue per superfici significativamente maggiori e per un'offerta più estesa di prodotti non alimentari; per tale motivo, esso non costituisce l'oggetto principale dell'analisi.

Il supermercato alimentare si configura dunque come l'unità funzionale più rappresentativa della GDO italiana e, al tempo stesso, come quella che presenta il miglior equilibrio tra diffusione territoriale, intensità energetica e complessità impiantistica. Queste caratteristiche lo rendono un caso studio particolarmente significativo per l'analisi delle strategie di sostenibilità ambientale e per l'integrazione di tecnologie innovative orientate alla riduzione dei consumi energetici e idrici.

Il supermercato come ecosistema tecnico-operativo

I supermercati contemporanei rappresentano sistemi complessi nei quali convergono infrastrutture tecnologiche, processi logistici, dinamiche di consumo e politiche di sostenibilità. Essi non costituiscono semplicemente spazi di vendita, ma vere e proprie piattaforme operative che integrano componenti energetiche, idriche, ambientali e gestionali. Comprendere tale funzionamento è essenziale per individuare le possibili applicazioni di una tecnologia AWG all'interno di questo contesto.

Da un punto di vista strutturale, il supermercato si compone di diverse unità funzionali che cooperano per garantire la conservazione, l'esposizione e la vendita dei prodotti. L'area dedicata al pubblico ospita scaffalature, banchi espositivi e reparti freschi, mentre gli spazi tecnici includono impianti di refrigerazione, celle frigorifere, sistemi HVAC per il trattamento dell'aria e locali di servizio destinati allo stoccaggio e alle attività del personale. La presenza di sistemi di refrigerazione è particolarmente rilevante poiché rappresenta uno dei principali fattori di consumo energetico e di generazione di calore di scarto, elemento che, come si vedrà, può risultare significativo per l'integrazione di tecnologie AWG.

La funzione primaria del supermercato è la conservazione e la distribuzione degli alimenti, attività che richiede un controllo continuo dei parametri microclimatici, quali temperatura, umidità relativa e qualità dell'aria. L'acqua costituisce una risorsa indispensabile non solo per le attività di pulizia e sanificazione, ma anche per vari processi interni come le preparazioni alimentari (gastronomia, panetteria) e i servizi resi alla clientela. Sebbene il consumo idrico sia generalmente meno evidente rispetto a quello energetico, esso assume un'importanza crescente nella prospettiva della sostenibilità e della riduzione dell'impronta idrica complessiva.

Negli ultimi anni, i supermercati hanno intensificato il proprio impegno verso le politiche di responsabilità ambientale, investendo in tecnologie a maggior efficienza energetica, recupero del calore, ottimizzazione dei consumi idrici e riduzione degli sprechi. Questo orientamento si inserisce in un quadro più ampio di transizione sostenibile, nel quale la capacità di innovare assume un valore centrale sia per la riduzione dei costi operativi sia per il miglioramento dell'immagine aziendale.

In tale scenario, l'introduzione di una tecnologia AWG può configurarsi come una grande opportunità. Il supermercato, infatti, offre condizioni operative particolarmente favorevoli alla produzione di acqua atmosferica: gli ambienti interni sono dotati di parametri termo-igrometrici relativamente stabili, la presenza di apparecchiature refrigeranti genera costantemente calore di scarto che può essere sfruttato per aumentare l'efficienza delle macchine AWG ibride, e la domanda di acqua è continua e diversificata. La possibilità di produrre acqua in situ, riducendo almeno in parte la dipendenza dalla rete idrica, risponde inoltre a crescenti esigenze di resilienza e sostenibilità, soprattutto in un settore caratterizzato da consumi costanti e difficilmente comprimibili.

7.1. DIFFUSIONE TERRITORIALE DELLA GDO ALIMENTARE IN ITALIA

Dal punto di vista territoriale, la GDO alimentare risulta maggiormente concentrata nelle regioni del Nord e del Centro Italia, dove la densità di punti vendita e la superficie media risultano più elevate. Tuttavia, negli ultimi anni si osserva una crescita significativa anche nel Mezzogiorno (Tabella 1), trainata soprattutto dall'espansione dei discount e dei supermercati di medie dimensioni. Questa evoluzione ha portato a una progressiva uniformazione del paesaggio commerciale, con edifici caratterizzati da layout ricorrenti, standard costruttivi simili e soluzioni impiantistiche comparabili.

Tra le principali insegne troviamo:

- Conad (Gruppo) conta circa quasi 3.000 punti vendita distribuiti su tutto il territorio nazionale, confermandosi leader numerico del mercato.
- Coop segue con oltre 1.620 punti vendita attivi.
- Spar (Despar/Eurospar/Interspar) raggiunge 1.531 negozi.
- Eurospin, principale operatore nel segmento discount, dispone di circa 1.243 punti vendita su scala nazionale.⁵⁷

La diffusione omogenea dei supermercati sul territorio nazionale implica una presenza costante di edifici energivori all'interno del tessuto urbano. Ogni punto vendita rappresenta un punto di consumo continuo di energia e risorse. Questo aspetto rende la GDO un settore strategico per l'attuazione di politiche di sostenibilità ambientale su larga scala, in quanto anche piccoli miglioramenti applicati a un numero elevato di strutture possono produrre effetti significativi in termini di riduzione degli impatti complessivi.

Tabella con esempi

LIDL ITALIA		
		
<p>Via larga 35, Bologna (BO) Superficie di 1500 m² Nuova costruzione Luogo ricco di pannelli solari ma con teli sui posti auto, con zona verde circostante e altre attività commerciali nella zona.</p>	<p>Viale della Regione Siciliana Nord Ovest, Palermo (PA) Superficie di 2700 m² Nuova costruzione Pannelli solari solo su circa il 13% della superficie del tetto, con teli sui posti auto e con zona verde circostante.</p>	<p>Via Francesco Grifoni 2, Matelica (MC) Superficie di 1700 m² Non sono presenti pannelli solari, posti auto non coperti luogo circondato da terreni incolti.</p>
COOP		
		
<p>Via Marsala 24, Monza (MB) Superficie di 2500 m² Costruzione del 2020 Presenza di pannelli solari dove possibile, parcheggio sotterraneo inserito nel contesto cittadino ma con aree verdi urbane limitrofe; vicinanza con campi da calcio e altre attività commerciali.</p>	<p>Viale Dante Alighieri 7, Finale Ligure (SV) Superficie di 2500 m² Nessuna presenza di pannelli solari, parcheggio ombreggiato da alberi e giardino pubblico adiacente all'edificio.</p>	<p>Coop, Via Giosue Carducci, 4, Quattromiglia (CS) Superficie di 4000 m² Presenza di pannelli solari sulla quasi totalità del tetto, parcheggio non ombreggiato. Edificio adiacente a due campi da calcio e verde urbano.</p>




CONAD		
		
<p>Via Badino, Terracina (LT) Superficie di 2600 m² Presenza di pannelli solari sulla totalità del tetto, parcheggio non ombreggiato con aiuole di separazione. Edificio adiacente ad un parco pubblico con verde urbano.</p>	<p>Via Giotto 24, Crescentino (VC) Superficie di 3000 m² Pannelli solari su circa il 50% del tetto, parcheggio non ombreggiato e senza vegetazione. Edificio adiacente a ville private con giardino e campi coltivati.</p>	<p>Via Erizzo 8, Valdobbiadene (TV) Superficie di 2000 m² Nessuna presenza di pannelli solari, parcheggio non ombreggiato con aiuole di separazione. Presenza di una scuola e di verde pubblico adiacenti all'edificio.</p>

Tabella 1 – Esempi di diverse catene della GDO

7.2. REPORT DI SOSTENIBILITÀ

L'analisi dei report di sostenibilità delle principali catene della grande distribuzione organizzata rappresenta un passaggio preliminare essenziale per valutare l'opportunità e l'impatto dell'introduzione di una tecnologia AWG all'interno di un supermercato. Questi documenti, infatti, illustrano nel dettaglio quali siano gli indicatori ambientali, energetici e gestionali già monitorati dalle aziende e consentono di individuare con precisione le aree in cui esiste un potenziale margine di miglioramento.

Esaminare questi report permette inoltre di avere un parametro di riferimento comparativo utile a contestualizzare la proposta di integrare una AWG nel punto vendita. In un'ottica di sostenibilità, la possibilità di ridurre il prelievo idrico dalla rete e di generare localmente parte della risorsa necessaria ai processi interni rappresenta un valore aggiunto pienamente coerente con gli obiettivi ESG (Environmental Social Governance) già dichiarati nei report.

Nella seguente tabella (Tabella 2) possiamo vedere le principali aree tematiche su cui si basano tutti i report di sostenibilità.

Area tematica	Focus principale	Indicatori comuni
Governance e strategia	Identità aziendale, modello di business, etica e integrità. Definisce la strategia di sostenibilità	Missione, struttura dirigenziale, codice etico, gestione dei rischi ESG.
Pianeta	Impegni e performance ambientali lungo l'intera catena del valore (punti vendita, logistica, prodotti).	Efficienza energetica e consumi, emissioni di CO ² e impronta climatica, gestione dei rifiuti, packaging sostenibile, spreco alimentare, consumi idrici.
Persone e comunità	Relazioni con i dipendenti, i clienti, i soci e la comunità locale.	Collaboratori (formazione, diversità, inclusione), salute e sicurezza sul lavoro, clienti (informazione e trasparenza), impatto sociale e territoriale (donazioni, iniziative locali).
Prodotti e filiera	Qualità, sicurezza e sostenibilità dei prodotti, in particolare quelli a Marca del Distributore (MDD).	Qualità e certificazioni, sviluppo di prodotti sostenibili, benessere animale, gestione etica della catena di fornitura.

Tabella 2 – Argomenti su cui si basano i report di sostenibilità

La sostenibilità nella GDO

Negli ultimi anni, le imprese della Grande Distribuzione Organizzata stanno assumendo un ruolo sempre più attivo nell'ambito della sostenibilità ambientale, sociale e di governance, anticipando in molti casi gli obblighi introdotti a livello europeo. L'obiettivo principale è quello di arrivare preparate all'adozione dei nuovi European Sustainability Reporting Standards (ESRS) previsti dalla Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), attualmente oggetto di revisione nell'ambito del cosiddetto Pacchetto Omnibus, che mira a semplificare gli obblighi di rendicontazione e a posticipare al 2028 l'entrata in vigore per alcune categorie di grandi imprese non quotate.

Un quadro quantitativo particolarmente significativo emerge dal Report di Sostenibilità di Settore della Distribuzione Moderna 2025⁵⁹. Il rapporto evidenzia un livello di maturità crescente del settore in materia di sostenibilità. In particolare, il 94% delle imprese della GDO risulta già impegnato nell'allineamento ai requisiti della CSRD, mentre l'80% dichiara l'intenzione di pubblicare un bilancio di sostenibilità volontario già nel 2025, anticipando di fatto le scadenze normative. Inoltre, il 59% delle imprese ha già definito una strategia di sostenibilità strutturata, dotata di obiettivi quantitativi misurabili.

Il report evidenzia come il 71% delle imprese disponga di una o più figure con deleghe formali alla sostenibilità. Parallelamente, il 47% delle aziende ha

implementato un sistema di gestione dei rischi aziendali che include esplicitamente i rischi ambientali, sociali e di governance, rafforzando il legame tra sostenibilità e processi decisionali strategici.

Contrasto al cambiamento climatico ed efficienza energetica

Per quanto riguarda il contrasto al cambiamento climatico, il settore della GDO mostra risultati concreti e misurabili. Tra il 2022 e il 2023, il comparto alimentare ha registrato una riduzione dell'intensità energetica pari al -9% in rapporto al fatturato e al -4% per metro quadro di superficie di vendita, a dimostrazione di un miglioramento diffuso delle prestazioni energetiche dei punti vendita.

Sul fronte delle emissioni climalteranti, il 41% delle imprese dichiara una riduzione delle emissioni superiore al 10% negli ultimi tre anni, mentre l'88% ha attivato interventi di efficienza energetica nei punti vendita, principalmente legati a refrigerazione, illuminazione e impianti HVAC.

Economia circolare e uso responsabile delle risorse

L'economia circolare rappresenta un altro pilastro centrale delle strategie di sostenibilità della GDO. Secondo il report, il 94% delle imprese ha adottato una strategia specifica per la gestione degli imballaggi, mentre l'82% ha implementato sistemi di tracciamento dei rifiuti pericolosi e non pericolosi. Tuttavia, solo il 59% delle aziende dispone di politiche formalizzate in materia di gestione circolare, segnalando un potenziale margine di miglioramento nella strutturazione delle strategie.

Il settore alimentare mostra un impegno particolarmente elevato nel contrasto allo spreco alimentare: il 100% delle imprese ha attivato partnership con organizzazioni dedicate alla redistribuzione delle eccedenze, mentre il 91% utilizza sistemi di monitoraggio quantitativo delle donazioni.

Lavoro, collaboratori e filiera

Sul piano sociale, il 41% delle imprese ha adottato politiche dedicate alla gestione degli impatti sui lavoratori, mentre il 35% affronta tali tematiche all'interno del Codice Etico aziendale. Sono diffusi strumenti di ascolto e coinvolgimento dei collaboratori, piani di welfare strutturati e iniziative per la parità di genere.

Anche lungo la catena di fornitura emerge una maggiore strutturazione delle pratiche ESG. Il 71% delle imprese ha adottato un codice di condotta per la catena di approvvigionamento, mentre l'83% include criteri di sostenibilità nei processi di selezione dei fornitori.

Relazione con le comunità locali

Infine, il rapporto evidenzia un coinvolgimento diffuso delle imprese della GDO nei confronti delle comunità locali: il 100% delle aziende ha attivato iniziative territoriali, in particolare nei settori dell'educazione, della salute, cultura e sport e dell'ambiente. Tuttavia, il 76% delle imprese non include ancora tali attività all'interno di documenti strategici formalizzati, suggerendo la necessità di un'evoluzione verso un approccio più strutturato e integrato.

Nel complesso, le evidenze di settore confermano come la GDO italiana stia attraversando una fase di transizione avanzata verso modelli di gestione più sostenibili e misurabili. Questo contesto rende particolarmente rilevante l'analisi dei singoli report di sostenibilità aziendali e fornisce il quadro di riferimento entro cui valutare l'introduzione di soluzioni tecnologiche innovative, come i sistemi di produzione di acqua atmosferica, in grado di contribuire concretamente al miglioramento delle performance ambientali dei punti vendita.

Controlli europei sui bilanci di sostenibilità

L'introduzione della direttiva CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) segna il passaggio definitivo dalla rendicontazione volontaria a un regime di obbligatorietà rigorosa per le catene della GDO.⁶⁰ La CSRD si applica alle grandi imprese che superano due dei tre criteri:

- 250 dipendenti
- 40 mln € di fatturato
- 20 mln € di totale attivo ⁶¹

L'Unione Europea mira a equiparare il bilancio di sostenibilità a quello finanziario, rendendo le informazioni ESG (Environmental Social Governance) trasparenti, confrontabili e certificate.⁶²

I controlli europei non si limiteranno alla verifica formale del documento, ma entreranno nel merito della qualità del dato attraverso:

- **Certificazione obbligatoria:** i report dovranno essere sottoposti a una *limited assurance* (revisione limitata) da parte di revisori legali o società di certificazione indipendenti. L'obiettivo è passare nel tempo a una *reasonable assurance* (revisione ragionevole), alzando progressivamente l'asticella dell'affidabilità.
- **Standard ESRS (European Sustainability Reporting Standards):** le aziende dovranno seguire gli standard ESRS, che impongono la "doppia materialità": l'impresa deve dichiarare sia come le proprie attività impattano sul pianeta, sia come i rischi climatici e sociali influenzano le proprie performance economiche.
- **Digital tagging:** Per facilitare i controlli automatici, i report dovranno essere redatti in formato XHTML con "tag" digitali, rendendo i dati leggibili dalle macchine e facilmente comparabili a livello UE.

Le date di riferimento per l'adeguamento normativo sono:

- Dal 1° gennaio 2024 (report 2025): Per le grandi imprese di interesse pubblico con oltre 500 dipendenti.
- Dal 1° gennaio 2025 (report 2026): Per tutte le altre grandi imprese che superano due dei tre criteri dimensionali (>250 dipendenti, >50M€ di fatturato o >25M€ di totale attivo).

- Dal 1° gennaio 2026 (report 2027): Per le piccole e medie imprese, con possibilità di rinvio al 2028.

La direttiva CSRD delega ai singoli Stati membri la definizione di sanzioni che devono essere effettive, proporzionate e dissuasive. In Italia, il mancato rispetto degli obblighi di rendicontazione o la fornitura di informazioni false/omesse può comportare diverse pene a seconda del livello di omissione.

Le conseguenze legate alle violazioni della normativa non si limitano al solo ambito legale, ma impattano l'azienda su più livelli. In primo luogo, dal punto di vista amministrativo, sono previste sanzioni pecuniarie proporzionali alla gravità dell'infrazione.

Oltre all'esborso diretto, l'azienda deve affrontare gravi ripercussioni reputazionali e finanziarie. Un'irregolarità può infatti causare l'esclusione dai rating ESG positivi, rendendo molto più complesso l'accesso al credito bancario e spingendo i fondi istituzionali a disinvestire.

Infine, il sistema sanzionatorio non risparmia i soggetti incaricati della revisione: anche chi si occupa della certificazione rischia pesanti provvedimenti qualora rilasci attestazioni non veritiere.

7.3. ANALISI DI ALCUNI REPORT DI SOSTENIBILITÀ

I bilanci di sostenibilità 2024 delle principali catene della Grande Distribuzione Organizzata (Coop⁶³, Conad⁶⁴, Lidl⁶⁵, Carrefour⁶⁶) presentano una struttura comune che riflette i principali standard internazionali di rendicontazione: introduzione strategica, struttura dirigenziale, analisi di materialità, capitoli dedicati all'ambiente (energia, emissioni, gestione risorse), filiera e aspetti sociali. Nonostante questa omogeneità formale, i contenuti mostrano differenze significative nei focus operativi: energia e clima restano temi prioritari in tutti i documenti, mentre il livello di approfondimento sul consumo idrico e sulla gestione dell'acqua varia sensibilmente tra le insegne soprattutto perché molte realtà della GDO (Grande Distribuzione Organizzata) non dispongono di tecnologie dedicate a una gestione attiva e innovativa della risorsa acqua. In particolare, Lidl e alcune realtà Conad forniscono informazioni più dettagliate e quantitativamente utilizzabili per analisi tecniche, mentre altre aziende privilegiano narrazioni strategiche e casi di studio territoriali.

7.3.1. CONFRONTO TECNICO DEI BILANCI DI SOSTENIBILITÀ DELLE PRINCIPALI CATENE GDO ITALIANE

L'analisi comparativa dei bilanci di sostenibilità 2024 delle principali insegne della Grande Distribuzione Organizzata in Italia (Lidl Italia, Conad, Carrefour Italia e Coop) evidenzia un sistema di rendicontazione ormai maturo, generalmente strutturato secondo gli standard GRI (Global Reporting Initiative) e coerente con gli obiettivi previsti dalla direttiva CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), una normativa dell'Unione Europea sulla rendicontazione di sostenibilità che intende migliorare la trasparenza delle informazioni ambientali, sociali e di governance delle aziende. Queste catene, pur condividendo un'impostazione metodologica simile, i report presentano livelli diversi di profondità, trasparenza e granularità dei KPI (Key Performance Indicator) ambientali.

Il confronto tecnico riportato di seguito analizza quattro aree centrali della sostenibilità nella GDO:

- energia,
- emissioni climalteranti,
- risorsa idrica e rifiuti,

integrando elementi di lettura trasversali e ricostruendo le principali strategie operative.

CONSUMI ENERGETICI E STRATEGIE DI EFFICIENZA

L'energia costituisce il tema di più alta materialità per tutte le insegne. La GDO presenta infatti consumi molto elevati a causa di processi tipici quali refrigerazione alimentare, climatizzazione dei locali, illuminazione continua e funzionamento continuo delle apparecchiature. L'efficientamento energetico rappresenta dunque sia una necessità ambientale sia un fattore competitivo.

Lidl Italia

Lidl adotta un approccio fortemente orientato alla standardizzazione tecnica e all'integrazione con le politiche del gruppo internazionale Schwarz. Il report evidenzia:

- un'intensità energetica pari a 2,1 GJ/m², molto competitiva nel settore;
- un'autoproduzione fotovoltaica del 5,1% dei consumi totali;
- installazione di impianti fotovoltaici su quasi metà dei punti vendita (43,8%);
- un piano strutturale di conversione degli impianti termici in pompe di calore, in ottica di progressiva elettrificazione.

Lidl dimostra di avere un Energy Management System ben sviluppato, con monitoraggi centralizzati, KPI normalizzati e obiettivi quantitativi misurabili.

Lidl Italia non rende pubblico nei propri report ufficiali il dato relativo alla superficie complessiva di vendita della rete. Il valore può essere stimato solo indirettamente, sulla base del numero di punti vendita e della superficie media di format, con un intervallo stimato compreso tra 850.000 e 950.000 m².

Conad

Conad presenta consumi molto più elevati in valore assoluto, pari a 4.725.474 GJ, coerenti con una rete estremamente estesa (3.530 punti vendita) e caratterizzata da una pluralità di cooperative territoriali con superficie totale di 2.709.959 m². Il report enfatizza:

- interventi di riqualificazione degli impianti (HVAC, illuminazione LED, refrigerazione a CO₂);
- ampliamento dei sistemi di monitoraggio dei consumi;
- diffusione di impianti fotovoltaici sui punti vendita e sui centri logistici;

- focus crescente sul miglioramento dell'isolamento degli edifici.

Il carattere cooperativo porta talvolta a una eterogeneità regionale degli interventi, ma complessivamente si osserva un avanzamento significativo verso l'efficienza energetica.

Carrefour Italia

Carrefour riporta consumi totali di 1.007.709,74 GJ, per 1.021.382 m² di superficie di vendita complessiva (diretta + franchising), acquistati quasi interamente dalla rete ma con una crescente quota rinnovabile. L'insegna ha dichiarato un obiettivo strategico importante: 100% energia da fonti rinnovabili entro il 2040, allineato alle strategie del gruppo internazionale.

Il report include anche:

- piani di revamping dei punti vendita,
- ampliamento dell'illuminazione LED,
- investimenti nel fotovoltaico,
- utilizzo di sistemi avanzati di monitoraggio.

L'approccio appare coerente, regolato centralmente e orientato alla decarbonizzazione progressiva.

Coop

Coop registra consumi da fonti non rinnovabili pari a 1.334.342 GJ e da fonti rinnovabili pari a 47.424 GJ, interamente prodotti dal fotovoltaico installato sulle proprie strutture. Per una superficie aree vendita pari a 894.062 m².

Il modello cooperativo comporta differenze tra le varie realtà regionali, ma emergono costanti comuni:

- chiusura banchi frigo,
- sostituzione impianti obsoleti,
- ottimizzazione degli impianti HVAC,
- upgrade diffuso ai LED,
- programmi specifici per il settore freschi, dove la refrigerazione costituisce la principale voce di consumo.

Analisi sui consumi

Il fatto che Lidl presenti indicatori normalizzati (GJ/m², % FV) e KPI strutturati suggerisce una maggiore maturità del sistema di gestione energetica rispetto a insegne come Conad, che invece dispongono di un patrimonio edilizio molto più diversificato. Carrefour si colloca in posizione intermedia ma con un chiaro orientamento strategico a lungo termine, mentre Coop unisce interventi tecnici a una forte impronta valoriale e territoriale.

EMISSIONI CLIMALTERANTI

La rendicontazione delle emissioni GHG, Greenhouse Gases (gas serra), rappresenta un elemento di continuità tra le catene, ma l'ampiezza degli Scope e il livello di dettaglio variano significativamente.

Gli Scope per Emissioni sono una classificazione standardizzata dal Greenhouse Gas Protocol per misurare e rendicontare le emissioni di gas serra (GHG) di un'azienda, suddividendole in:

- Scope 1: comprende le emissioni generate direttamente da fonti di proprietà derivanti dal consumo di energia termica e dall'utilizzo di combustibile per le auto aziendali.
- Scope 2: comprende le emissioni indirette derivanti dalla generazione di energia elettrica acquistata e consumata per le proprie attività.
- Scope 3: comprende tutte le emissioni indirette lungo l'intera catena del valore (a monte e a valle). Include logistica (distribuzione primaria/secondaria), viaggi d'affari e pendolarismo dei dipendenti. Copre anche le emissioni di gas serra (GHG) e altri inquinanti prodotte nelle fasi "a monte" del ciclo di vita di un carburante o vettore energetico, prima che questo raggiunga il veicolo, includendo estrazione, raffinazione, trasporto alle raffinerie e distribuzione fino alla pompa o stazione di ricarica. Comprende anche le perdite della rete elettrica per le sedi proprie. Infine, include le emissioni Scope 1 e 2 di tutte le sedi e punti vendita associati.

Lidl Italia

Con emissioni pari a 8.106.102,4 tCO₂e, Lidl mostra una riduzione del 56,6% dal 2019, ottenuta attraverso:

- efficientamento energetico,
- riduzione delle perdite di gas refrigeranti (principale voce Scope 1 nella GDO),
- ottimizzazione logistica,
- partnership con fornitori per ridurre le emissioni Scope 3.

Lidl adotta un modello di misurazione estremamente dettagliato, con indicatori per singolo processo e cluster tecnologico.

Conad

Conad riporta emissioni pari a 407.977 tCO₂e, con un leggero aumento dello 2,6%, attribuito all'ampliamento del perimetro rendicontato.

Oltre all'efficienza energetica, il report sottolinea:

- interventi per ridurre le perdite dei refrigeranti,
- iniziative logistiche (ottimizzazione trasporti e riorganizzazione dei flussi),
- progetti per la filiera agricola.

La gestione delle emissioni Scope 3 è ancora variabile a causa delle differenti cooperative.

Carrefour Italia

Carrefour mostra emissioni pari a 166.570,9 tCO₂e, con una riduzione del 35% dal 2019.

La catena è particolarmente attiva sullo Scope 3 grazie al progetto di “Transizione alimentare”, che interviene sugli impatti di produzione, trasformazione e logistica dei prodotti commercializzati.

Le politiche includono:

- progressiva elettrificazione della flotta,
- interventi nei centri logistici,
- partnership con produttori certificati.

Coop

Coop registra emissioni pari a 273.328 tCO_{2e}, in riduzione del 6% sul 2023. Il report cooperativo enfatizza tre aree tecniche:

- riduzione delle perdite di refrigeranti,
- incremento delle fonti rinnovabili,
- efficientamento delle flotte veicolari.

Analisi sulle emissioni

Lidl e Carrefour risultano i venditori più avanzati nel trattamento degli Scope 1-3, perché integrano la misurazione con obiettivi scientificamente fondati e hanno una direzione unitaria. Conad e Coop mostrano invece ottime prestazioni operative, ma una rendicontazione meno omogenea.

RISORSA IDRICA

La risorsa idrica è il tema meno uniforme tra le insegne e spesso meno centrale rispetto ad energia ed emissioni. Ciò accade perché i consumi degli iper/supermercati sono più bassi rispetto ad altri settori industriali e coinvolgono processi con impatti relativamente contenuti. Tuttavia, l’acqua resta un KPI (Key Performance Indicator) rilevante per reparti come ortofrutta, gastronomia, pescheria e servizi igienici.

Lidl

Lidl presenta dati completi, con un prelievo di 837.063,49 m³ e un progetto pilota di recupero delle acque meteoriche che ha ridotto fino al 65% il prelievo per usi esterni nel complesso di Villafranca. Il report adotta una visione di “Gestione responsabile delle acque”, che considera sia consumi diretti sia effetti sulla biodiversità.

Conad

Conad non riporta un consumo idrico nazionale aggregato. Le descrizioni si concentrano su:

- riduzione della plastica monouso,
- uso efficiente dell’acqua per irrigazione urbana,
- iniziative regionali delle cooperative.

Il tema risulta di materialità medio-bassa nelle operazioni.

Carrefour

Carrefour presenta un approccio più tecnico, con un'intensità idrica di 0,99 m³ per m², in riduzione del 21%. Ciò implica un sistema di monitoraggio capillare e la gestione intelligente dei consumi attraverso:

- rubinetteria smart,
- circuiti di raffreddamento chiusi,
- manutenzione predittiva.

Coop

Coop riporta consumi totali pari a 1.806.000 m³, con un incremento attribuito anche all'ampliamento del perimetro rendicontato. Le azioni riguardano soprattutto:

- gestione delle perdite,
- trattamenti efficienti negli stabilimenti produttivi,
- razionalizzazione degli usi nei reparti freschi.

Analisi sulla risorsa idrica

La forte variabilità tra le catene rende il tema idrico quello con la minore comparabilità. Solo Carrefour e Lidl forniscono KPI normalizzati e tecnicamente robusti. Ciò rappresenta un'opportunità per soluzioni innovative (come sistemi AWG o water-reuse) e permette di sottolineare un divario strutturale nella GDO italiana.

GESTIONE DEI RIFIUTI ED ECONOMIA CIRCOLARE

La gestione dei rifiuti è un pilastro della sostenibilità e un indicatore fortemente correlato allo spreco alimentare e al packaging.

Lidl

Lidl mostra un incremento del 4,1% dei rifiuti, ma un tasso di recupero del 74,3%, con un obiettivo al 2030 del 95%. Le iniziative comprendono:

- ottimizzazione delle filiere di imballaggio,
- riciclo interno dei materiali,
- programmi contro lo spreco alimentare.

Conad

Nel caso Conad, i dati variano territorialmente. Conad Nord Ovest dichiara 3.778 tonnellate (+7%) e un tasso di recupero del 68%.

Particolarmente rilevanti le iniziative su:

- riduzione delle eccedenze tramite sistemi di previsione della domanda,
- donazioni alimentari,
- revisione dei packaging.

Carrefour

Carrefour presenta la performance più elevata, con 97% di rifiuti recuperati, con l'obiettivo di raggiungere il 100% entro il 2025.

Il modello Carrefour si distingue per:

- forte integrazione con la filiera,
- programmi strutturati di economia circolare,
- coinvolgimento diretto dei fornitori.

Coop

Coop produce 42.582,2 tonnellate di rifiuti, con un lieve calo dello 0,7%. Le cooperative sono storicamente tra le più attive nel contrasto allo spreco alimentare e nel riciclo di materiali di imballaggio, grazie a programmi consolidati e collaborazioni territoriali.

Analisi sulla gestione dei rifiuti

Carrefour emerge come migliore nel campo del riciclo, mentre Lidl mostra un modello in forte crescita. Coop e Conad mantengono buon livello operativo ma con variabilità interna.

Nel complesso, il settore GDO mostra una transizione ecologica avanzata ma non ancora completamente standardizzata, con significativi margini di miglioramento in particolare nella gestione della risorsa idrica e nella misurazione delle emissioni di Scope 3.

TABELLA RIASSUNTIVA

	Lidl Italia	Conad	Carrefour Italia	Coop
N. punti vendita	777 p.v. ~900.000 m ²	3.530 p.v. 2.709.959 m ²	1185 p.v. 1.021.382 m ²	346 p.v. 894.062 m ²
Energia primaria	583,34 kWh/m ²	483,34 kWh/m ²	275,00 kWh/m ²	430,56 kWh/m ²
Emissioni climalteranti solo scope 1, 2	0,03 tCO ₂ e/m ² ; 9 tCO ₂ e/m ² contando Scope 3	0,15 tCO ₂ e/m ²	0,16 tCO ₂ e/m ²	0,31 tCO ₂ e/m ²
Prelievo idrico (m³/m²)	0,93 m ³ /m ²	Prelievi idrici non dichiarati.	0,99 m ³ /m ²	2,02 m ³ /m ²
Creazione di rifiuti e % di riciclo	0,16 ton/m ² . Con un riciclo del 74,3%	0,0078 ton/m ² . Con riciclo del 68% Dati solo di Conad Nord Ovest	0,02 ton/m ² . Con un riciclo del 97%	0,07 ton/m ² . Con un riciclo del 89%

Tabella 3 – Tabella riassuntiva dei report citati in precedenza

7.4. PRATICHE ESTERE NELLA GDO

All'estero, il supermercato viene interpretato come un vero e proprio centro energetico e di risorse, con una maturità tecnologica che offre importanti punti di riferimento per l'evoluzione del settore in Italia.

Le strategie per la sostenibilità nel settore della vendita al dettaglio si stanno evolvendo rapidamente, muovendosi verso una visione sempre più integrata. Se in Italia il processo di efficientamento è attualmente focalizzato su interventi puntuali, come l'installazione di banchi frigo chiusi e il passaggio all'illuminazione LED, all'estero si sperimenta già un approccio sistemico. In Danimarca e Germania, ad esempio, alcuni punti vendita "Net-Zero" hanno trasformato lo spreco in risorsa: il calore di scarto dei sistemi di refrigerazione non viene disperso, ma recuperato per alimentare le reti di teleriscaldamento cittadine.⁶⁷

Un altro pilastro fondamentale è la gestione circolare dell'acqua, un tema centrale in aree soggette a forte stress idrico come l'Australia⁶⁸ o alcune zone degli Stati Uniti.⁶⁹ In questi contesti, molte catene della grande distribuzione integrano sistemi avanzati di riutilizzo idrico e tecnologie simili alle Atmospheric Water Generator (AWG). L'acqua così recuperata viene impiegata per la produzione di ghiaccio o per l'irrigazione di tetti e pareti verdi, riducendo drasticamente la dipendenza dalla rete idrica pubblica.

Infine, il cambiamento è guidato da impegni formali come i Science Based Targets (SBTi). Grandi colossi internazionali, tra cui Tesco⁷⁰ e Walmart,⁷¹ hanno adottato obiettivi di riduzione delle emissioni validati scientificamente. Questo impegno ha un effetto a catena su tutta la filiera: per abbattere le emissioni di Scope 3 queste multinazionali impongono standard ecologici rigorosi a tutti i loro partner, influenzando di fatto l'intera filiera agroalimentare globale.⁷²

L'esperienza estera dimostra che l'innovazione non è data da un singolo macchinario, ma dalla capacità di far dialogare i sistemi: il fotovoltaico alimenta la refrigerazione, il calore dei frigo scalda l'acqua e l'umidità dell'aria diventa una risorsa idrica di processo. Questo modello rappresenta il traguardo a cui la GDO italiana dovrà tendere per rispondere alle sfide della CSRD.

7.5. UNA SOLUZIONE PER L'INCREMENTO DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

Sotto il profilo ambientale, una macchina AWG può contribuire a diminuire il consumo di acqua potabile proveniente dalla rete idrica, rispondendo così a un'esigenza reale dei supermercati, che utilizzano quotidianamente acqua per operazioni di pulizia, sanificazione, gestione del reparto ortofrutta, produzione di ghiaccio e altre funzioni tecniche. La possibilità di produrre acqua in situ, attraverso l'estrazione e la condensazione del vapore presente nell'aria, riduce l'impatto sulla risorsa idrica locale e può tradursi in un miglioramento significativo dell'impronta idrica complessiva del punto vendita.

Dal punto di vista energetico, la tecnologia AWG offre ulteriori sinergie con le infrastrutture già presenti. Una parte consistente dei consumi energetici dei supermercati deriva dagli impianti di refrigerazione e climatizzazione, che generano

costantemente calore di scarto; tale calore può essere recuperato e riutilizzato, migliorando così l'efficienza complessiva del sistema. Questo aspetto è particolarmente rilevante poiché molti report di sostenibilità evidenziano proprio l'attenzione delle catene della GDO all'ottimizzazione dei consumi energetici e alla valorizzazione dei flussi termici residui.

L'introduzione di una AWG contribuisce inoltre a rafforzare la resilienza operativa del punto vendita, soprattutto in contesti urbani o in regioni soggette a stress idrico. La disponibilità di una fonte alternativa di acqua permette infatti di garantire una forma di autosufficienza parziale che può rivelarsi utile in situazioni di crisi, riducendo il rischio di interruzioni dei servizi o della continuità operativa del supermercato.

Anche dal punto di vista della comunicazione aziendale l'adozione di una macchina AWG rappresenta un'opportunità rilevante. L'installazione di una tecnologia innovativa, accompagnata dalla misurazione costante dei benefici ambientali come la quantità di acqua prodotta, il risparmio idrico ottenuto, la riduzione del prelievo dalla rete e l'eventuale contenimento delle emissioni; consente alla catena di presentare dati oggettivi, verificabili e immediatamente comunicabili all'interno dei futuri report di sostenibilità. Questo contribuisce a rafforzare il profilo ambientale dell'azienda, migliorandone la trasparenza e consolidandone la reputazione con i clienti e comunità locali.

Infine, la presenza di sistemi di monitoraggio integrati nella AWG permette di generare dati in tempo reale che possono essere utilizzati anche per processi decisionali interni orientati all'efficientamento continuo. L'adozione della AWG non si limita dunque a introdurre una nuova fonte d'acqua, ma si configura come un intervento strutturale capace di migliorare la performance ambientale, la reputazione e la qualità gestionale dell'intero punto vendita.

8. METODOLOGIA DI ANALISI E STRUMENTI DI SIMULAZIONE

Ai fini della presente ricerca, la valutazione delle performance energetiche del sistema di climatizzazione di un supermercato è stata eseguita attraverso la simulazione energetica dinamica (BPS). Tale metodologia costituisce uno strumento avanzato che, impiegando dati di input precisi e un modello opportunamente calibrato, permette di analizzare il comportamento termico-energetico di un edificio con un elevato grado di fedeltà.

Per l'implementazione della BPS è stato selezionato il software DesignBuilder, riconosciuto come uno dei più evoluti strumenti di modellazione termoenergetica disponibili. La sua efficacia risiede nella capacità di interfacciarsi con il motore di calcolo EnergyPlus, lo standard di riferimento internazionale per le simulazioni dinamiche in edilizia. L'utilizzo congiunto di questi strumenti consente lo sviluppo di un modello energetico dettagliato, che può essere calibrato sui consumi reali e impiegato per simulare in modo affidabile le prestazioni dell'edificio in tutte le diverse condizioni operative stagionali e d'uso.

Software DesignBuilder: architettura e funzionalità

DesignBuilder è un ambiente software di simulazione che integra la modellazione tridimensionale dell'involucro edilizio con il calcolo dinamico orario delle prestazioni energetiche, avvalendosi del solutore EnergyPlus. L'obiettivo primario di questo strumento è assistere professionisti, progettisti e ricercatori nell'analisi del regime energetico degli edifici, considerando in dettaglio tutti i fattori che lo influenzano: l'involucro edilizio, i carichi interni (persone, attrezzature, illuminazione), gli impianti tecnologici e le variabili climatiche esterne.

Grazie alla sua struttura modulare, DesignBuilder permette di valutare con precisione:

- I fabbisogni termici (riscaldamento) e frigoriferi (raffrescamento).
- I consumi energetici, distinguendo tra componente elettrica e termica.
- Le condizioni di comfort termoigrometrico interne.
- I parametri relativi alla ventilazione e al ricambio d'aria.

Tutti questi indicatori di prestazione sono calcolati su base oraria per l'intero anno, garantendo una valutazione dinamica e realistica delle performance dell'immobile. Il software adotta, inoltre, un sistema di template parametrici che velocizza e uniforma l'assegnazione delle caratteristiche fisiche, impiantistiche e operative alle zone modellate, semplificando notevolmente l'impostazione degli scenari di simulazione.

Dati di input per la simulazione

La simulazione energetica dinamica in DesignBuilder è costruita a partire da tre pilastri fondamentali: i dati climatici di riferimento, il modello geometrico dell'edificio e la definizione dei profili operativi.

Dati climatici: Per una modellazione accurata, sono indispensabili i file climatici orari che descrivono le condizioni meteorologiche tipiche di un sito specifico lungo un anno intero. Questi dati, che garantiscono l'attendibilità delle simulazioni, provengono da fonti istituzionali accreditate (quali ENEA, ARPA regionali, CTI e UNI), che si basano su serie storiche rilevate da stazioni meteo. Le variabili considerate includono: temperatura dell'aria, umidità relativa, direzione e velocità del vento, copertura nuvolosa e, in particolare, la radiazione solare diretta e diffusa. Quest'ultimo elemento è cruciale per la stima degli apporti solari attraverso le superfici vetrate e per la valutazione dell'accumulo termico della massa strutturale.

Modello geometrico e suddivisione in zone: Una fase preliminare essenziale è la ricostruzione tridimensionale dell'edificio, che viene realizzata importando ed elaborando planimetrie, prospetti e sezioni architettoniche. Questa operazione definisce con precisione l'involucro esterno e la sua suddivisione interna in zone termiche, sulle quali verranno poi mappati i parametri di utilizzo, impianto e costruzione. Il modello geometrico risultante funge da base per tutte le elaborazioni energetiche, consentendo una rappresentazione fedele del comportamento termoenergetico nel tempo.

Profili operativi e termofisici: Il modello integra profili di occupazione definiti in base alla destinazione d'uso degli ambienti. Ogni zona termica è associata a un set di parametri che specifica: orari di attività, densità di occupazione, carichi interni generati da persone e apparecchiature, e apporti luminosi. A questi si aggiungono i profili di funzionamento impiantistico, che riproducono le reali logiche di attivazione dei sistemi HVAC (ad esempio, distinguendo tra servizio continuo e intermittente).

Particolare attenzione è dedicata alla modellazione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro. Per ogni elemento costruttivo (muri, solai, coperture, serramenti) vengono definite le stratigrafie, le trasmittanze termiche, la capacità termica dei materiali, la massa superficiale e lo spessore. Questo dettaglio è fondamentale per rappresentare correttamente il comportamento dinamico del sistema edificio-impianto, tenendo conto dell'inerzia termica e della risposta ai carichi variabili.

Struttura del modello e template parametrici

Il modello tridimensionale realizzato in DesignBuilder, a partire dai dati geometrici, viene strutturato suddividendolo in zone termiche. Ciascuna zona rappresenta un'area con condizioni di utilizzo e caratteristiche termoenergetiche omogenee. Questa segmentazione è fondamentale per poter assegnare, a livello locale, i parametri specifici di occupazione, carichi interni, sistemi impiantistici e proprietà costruttive, fornendo il fondamento per simulazioni dinamiche realistiche.

Ad ogni zona sono associati i seguenti template parametrici (Figura 9), che definiscono in dettaglio le condizioni operative e fisiche:

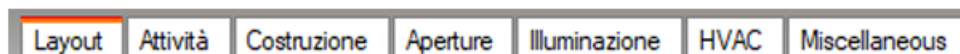


Figura 9 - Differenti template parametrici – DesignBuilder

- Template Attività (Figura 10): Delinea le condizioni d'uso previste per la zona, risultando determinante per la definizione dei carichi interni e dei fabbisogni. I parametri chiave includono la tipologia di attività (che influisce sui carichi termici e sulla produzione di CO₂), i *setpoint* di temperatura, il controllo dell'umidità e i tassi di ventilazione meccanica richiesti.



Figura 10 – Template attività - DesignBuilder

- Template Costruzione (Figura 11): Descrive le proprietà termofisiche degli elementi costruttivi. Per ogni superficie, sono definite le stratigrafie dei materiali (spessore, conducibilità, densità, calore specifico), da cui si derivano la trasmittanza e la capacità termica. Vengono inoltre specificati

l'orientamento, l'esposizione solare e i dettagli costruttivi (ponti termici, contatto con il terreno), che influenzano l'interazione tra l'edificio e l'ambiente esterno.

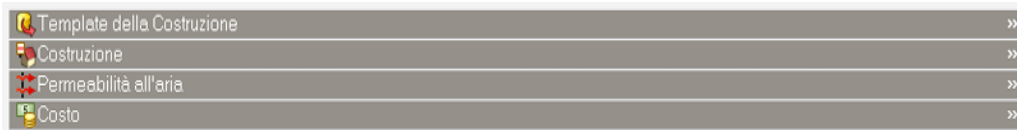


Figura 11 - Template costruzioni - DesignBuilder

- **Template Aperture (Figura 12):** Specifica le caratteristiche geometriche e prestazionali degli elementi trasparenti (finestre, lucernari, porte esterne). Questi elementi hanno un impatto significativo sulle dispersioni, sugli apporti solari, sulla ventilazione naturale e sull'illuminazione diurna. Vengono definiti i parametri termo-ottici (trasmittanza, fattore solare), le caratteristiche del telaio e la presenza e il comportamento dinamico di eventuali sistemi di schermatura solare. Per le aperture apribili, sono inclusi i dati relativi alla ventilazione naturale (modalità, area utile e tempi di attivazione).

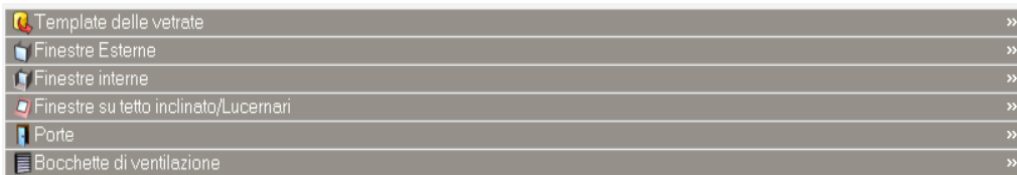


Figura 12 – Template aperture - DesignBuilder

- **Template Illuminazione (Figura 13):** Definisce le caratteristiche dell'illuminazione artificiale, con impatto sui carichi interni e sui consumi elettrici. È possibile specificare la potenza installata per unità di superficie (espressa in W/m^2), valore che rappresenta la densità di potenza luminosa in rapporto alla superficie calpestabile dell'ambiente. Oltre alla potenza, si definisce un profilo orario di attivazione e la logica di controllo (manuale, automatica, dipendente dall'occupazione).

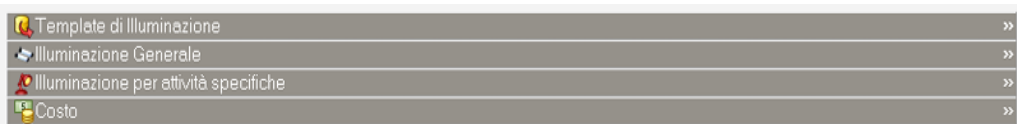


Figura 13 – Template illuminazione - DesignBuilder

- **Template HVAC (Figura 14):** Permette l'associazione di un sistema impiantistico semplificato a ciascuna zona termica per la gestione di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e controllo dell'umidità. Pur non modellando la rete di distribuzione, questo template consente di impostare *setpoint*, orari di funzionamento e logiche di controllo per stimare in modo efficace i fabbisogni termici ed elettrici legati alla climatizzazione e alla ventilazione.

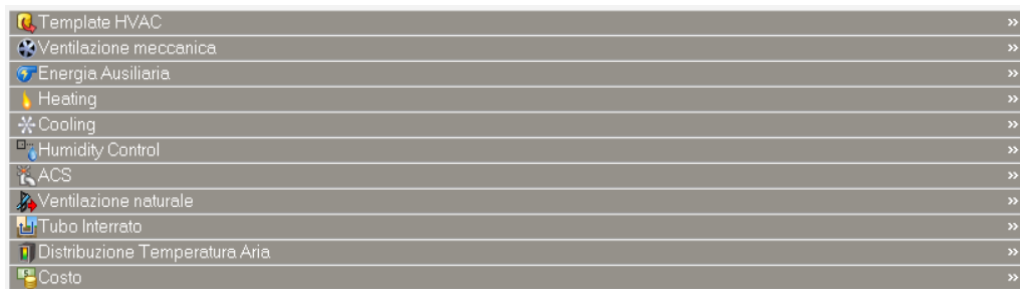


Figura 14 – Template HVAC - DesignBuilder

Grazie a questa flessibilità e modularità, DesignBuilder è in grado di eseguire simulazioni dinamiche dettagliate, producendo risultati orari per l'intero anno. Tali risultati forniscono indicatori di prestazione energetica essenziali, quali il fabbisogno termico e frigorifero, i consumi elettrici e termici, i profili di temperatura interna e la stima dei volumi di condensa prodotti dagli impianti.

8.1. CONFRONTO TRA SIMULAZIONE DINAMICA E STAZIONARIA

A differenza delle metodologie di calcolo stazionario, che offrono una valutazione aggregata (tipicamente su base mensile o stagionale), la simulazione dinamica (BPS) garantisce un'analisi dettagliata su base oraria. La BPS considera l'evoluzione temporale di tutti i fattori: le condizioni climatiche esterne, i profili di utilizzo interni e le risposte termiche dell'edificio.

Questa specificità è determinante per l'analisi di edifici con elevata complessità funzionale, come le strutture ospedaliere. In tali contesti, infatti, i carichi energetici sono altamente variabili e lo sfasamento tra la domanda di energia e la risposta del sistema impiantistico può incidere significativamente sulle prestazioni complessive.

La BPS permette di:

- Identificare con precisione i picchi di carico termico e frigorifero.
- Valutare l'effetto dell'inerzia termica delle masse strutturali.
- Analizzare le logiche di controllo degli impianti e ottimizzare le strategie gestionali in base al reale profilo d'uso.

9. VALIDAZIONE DEI CRITERI INDIVIDUATI AD UN CONTESTO REALE

Dall'analisi dei casi studio disponibili e della letteratura sul miglioramento dell'efficienza energetica di supermercati emerge chiaramente che un supermercato è un edificio ad altissima intensità energetica. Questo studio del supermercato mette in evidenza un quadro chiaro: gran parte dei consumi e delle criticità dell'edificio non deriva da un singolo elemento, ma dall'interazione complessa e continua tra refrigerazione, climatizzazione, illuminazione, ventilazione e gestione dell'acqua. Le necessità progettuali che emergono non sono quindi interventi isolati, ma risposte interdipendenti a un sistema nel quale ogni componente influenza le prestazioni dell'altra.

Per questo motivo, le strategie di ottimizzazione vanno interpretate non come correzioni puntuali, bensì come un insieme organico di scelte capaci di trasformare il supermercato da struttura energivora a organismo energeticamente intelligente.

9.1. MODELLO DI SUPERMERCATO

L'analisi delle caratteristiche geometriche, impiantistiche e operative di supermercati appartenenti alla stessa fascia dimensionale ha permesso di definire un modello rappresentativo della grande distribuzione organizzata. Composto da un'ampia sala vendita, un magazzino funzionale, servizi igienici, spogliatoi e locali tecnici che riflette le esigenze tipiche della GDO ⁷³, anche le caratteristiche dell'involucro edilizio e degli impianti sono simili a quelle dei casi reali di GDO.^{74 75}

Caratteristiche architettoniche e fisiche

Il modello di edificio su cui vengono effettuate le successive analisi energetiche presenta una pianta rettangolare compatta ⁷⁶, con altezza di 5 metri e un buon rapporto di forma⁷⁷. Le superfici di ciascuna zona del supermercato sono state attribuite alle varie destinazioni (area di vendita, magazzino, zona casse, servizi igienici⁷⁸ e spogliatoi ⁷⁹) in conformità alle prescrizioni normative vigenti in materia.⁸⁰

In generale la struttura di un supermercato per la GDO presenta superfici vetrate, pensate per massimizzare l'illuminazione naturale senza penalizzare i consumi energetici. Nel modello queste superfici sono state considerate limitate alla facciata esposta a Sud.

Le strutture opache (pareti, copertura e pavimento) sono state selezionate in modo da essere congruenti con le caratteristiche comuni a edifici di questo tipo⁸¹, mentre la dotazione di porte automatiche e tagliafuoco segue le normative di sicurezza.⁸²

È stato previsto nel modello anche un'area destinata al parcheggio esterno caratterizzata dal suolo drenante e circondato da una siepe divisoria come da normativa.⁸³

Carichi interni significativi

L'analisi dei profili di occupazione dei casi analizzati in letteratura mostra picchi fino a 200 clienti e 45 dipendenti ⁸², con effetti diretti sui carichi interni sensibili e latenti ^{84 85}. A ciò si aggiunge una ventilazione richiesta molto elevata, tra 10 e 15 l/s·persona ^{85 86}, più il contributo dovuto ai banchi refrigerati che nell'arco della giornata rappresenta una quota importante del fabbisogno energetico HVAC. Anche l'illuminazione, sebbene totalmente a LED, introduce un carico costante.

Anche se modulati nel tempo, per un'apertura giornaliera estesa dalle 8:00 alle 21:00 tutti questi fattori concorrono a generare una domanda energetica continua e non trascurabile.

Per entrambi i carichi considerati sono state compilate delle tabelle occupazionali con lo scopo di regolare la ventilazione⁸⁷ e l'illuminazione⁸⁸ durante la giornata ^{85 89 90}; da queste schedule deriva che esistono due momenti di picco, durante le ore centrali della giornata e quelle serali.⁸⁴

Carichi elettrici e refrigerazione

La refrigerazione ha un impatto significativo sul bilancio energetico del supermercato. Ciò dipende dalla grande quantità di banchi verticali e orizzontali, dalla loro classe energetica ⁹¹ e dal fatto che molti modelli aperti disperdono notevoli quantità di energia nell'ambiente.⁹²

Anche i carichi elettrici di processo (casce, banchi gastronomia, uffici, attrezzature) contribuiscono in modo consistente.^{14 89}

HVAC

Per mantenere condizioni interne adeguate (17-19°C in inverno, 25–27°C in estate), l'UTA deve gestire:

- gli apporti interni di persone, illuminazione e apparecchiature,
- i contributi sia termici che latenti della refrigerazione,
- una ventilazione elevata per qualità dell'aria interna.

Nei supermercati, raffrescamento e ventilazione rappresentano una quota predominante del fabbisogno energetico complessivo

Consumi idrici

La domanda idrica complessiva è articolata in molte componenti ⁹³:

- Acqua calda sanitaria (docce, lavabi, lavorazione nei reparti freschi, servizi clienti) ⁹⁴
- acqua fredda interna (WC, lavaggi, ghiaccio, ortaggi)
- irrigazione del parcheggio e del verde principalmente nella stagione secca^{95 96}

Il peso dell'irrigazione risulta particolarmente significativo, i parcheggi verdi, pur migliorando qualità urbana e drenaggio, richiedono una gestione idrica mirata.⁹⁷

Ripartizione consumi energetici

Il modello di supermercato è stato realizzato in modo da essere caratterizzato un consumo energetico realistico e allineato ai casi di studio europei per il settore GDO con una ripartizione tipica del settore dove la refrigerazione consuma quasi la metà dei consumi totali seguita da HVAC (Figura 15).⁹⁸

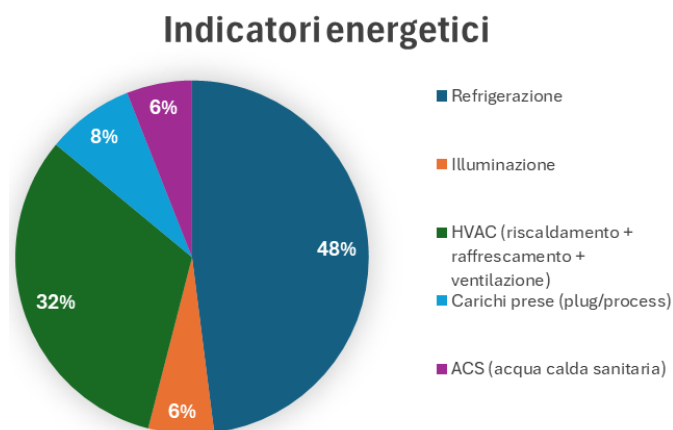


Figura 15 – Indicatori energetici di un supermercato

9.2. IMPOSTAZIONI DELLA PROCEDURA DI CALCOLO

- A. **Raccolta dei dati:** come descritto nei paragrafi precedenti, sono stati acquisiti i dati geometrici e impiantistici relativi a edifici con caratteristiche analoghe, al fine di sviluppare un modello rappresentativo e funzionale. Parallelamente, sono stati raccolti i dati climatici orari relativi a tre differenti aree geografiche italiane (Milano, Roma e Bari), successivamente impiegati nell'analisi comparativa delle prestazioni del sistema in diverse condizioni climatiche. Tali dati provengono da fonti ufficiali messe a disposizione da ARPA.
- B. **Modellazione dell'edificio e del sistema HVAC:** le proprietà fisiche dell'involucro edilizio e la configurazione degli impianti sono state implementate all'interno di un modello energetico sviluppato mediante il software DesignBuilder. Il modello energetico è stato progressivamente calibrato in ambiente DesignBuilder sulla base dei risultati ottenuti a seguito di ogni modifica, al fine di assicurare un'elevata affidabilità delle simulazioni e dei risultati previsionali.
- C. **Stato di fatto e confronto tra scenari:** i consumi energetici complessivi del supermercato sono stati analizzati e confrontati considerando due distinti scenari: una configurazione A, riferita a ciascuna zona climatica in assenza dell'impianto AWG, e una configurazione B, relativa alle medesime zone climatiche ma con integrazione del sistema AWG. Tale confronto ha consentito di quantificare i potenziali benefici energetici derivanti dall'adozione della soluzione tecnologica proposta.

Geometrie e stratigrafie delle pareti

Partendo dalle indicazioni reperite dall'analisi della letteratura citata in è stata realizzata dapprima una pianta tipo con le caratteristiche delle aree e degli spazi desunte dalle precedenti analisi sul software Autocad (Figura 16).

Il supermercato di un piano alto 5 m con pianta rettangolare 60m x 40m e con area lorda di 2400 m² presenta varie zone dimensionate in base ai criteri di legge vigenti:

- magazzino 450 m²;
- locali tecnici/uffici 150 m²;
- bagni clienti suddivisi a loro volta in un bagno maschile e uno femminile da 10 m² l'uno, un bagno per disabili di 5 m² tutti preceduti da un antibagno di 8 m²;
- spogliatoi per dipendenti da 40 m² l'uno;
- ingresso con carrelli 25 m²;
- sala vendita di 1650 m² che al suo interno presenta:
 - zona casse di 200 m²;
 - zona banchi freschi suddivisa in due zone per un totale di 375 m²;
- parcheggio di circa 5100 m² (compresa zona verde) per un totale di 183 posti auto compresi 4 disabili come per legge (1 ogni 50)

Bagni

Uno studio più approfondito è stato svolto sul dimensionamento dei bagni e degli spogliatoi. Date le dimensioni dell'immobile sono previsti 3 bagni, un maschile, uno femminile e uno unisex/disabili di dimensioni totali pari a 25 m² così composti:

- Maschile composto da 2 WC, 2 lavabi e 1 urinatoio;
- Femminile composto da 2 WC, 2 lavabi;
- Unisex/disabili composto da 1WC, 1 lavabo.

Spogliatoi

Seguendo le indicazioni normative gli spazi destinati a spogliatoi per i dipendenti sono così costituiti:

- Spogliatoio femminile con bagni di dimensioni pari a 40 m² con in dotazione: 25 armadietti, 3 WC, 3 lavabi, 1 doccia, panca, appendiabiti, area asciugatura sacche.
- Spogliatoio maschile con bagni anch'esso di 40 m² con in dotazione: 25 armadietti, 2 WC, 2 urinali, 3 lavabi, 1 doccia, panca.

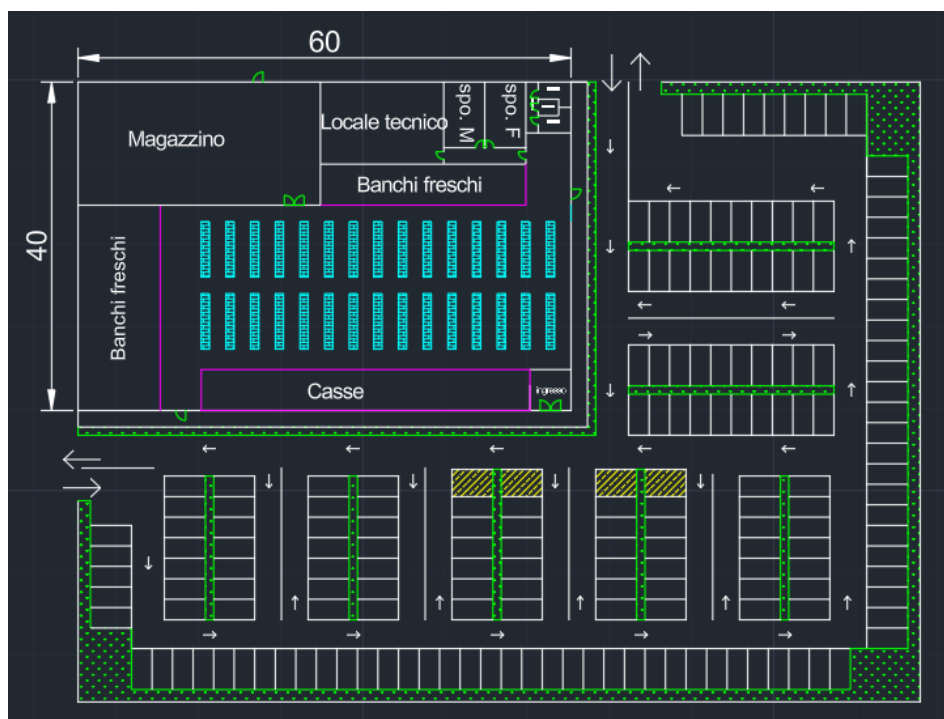


Figura 16 - Pianta del modello sul software AutoCad

Stratigrafie

Le murature sono state ipotizzate come caratteristiche di edifici esistenti. Per queste si fa riferimento all'abaco delle pareti della norma tecnica UNI/TR 11552.⁹⁹

Per le pareti perimetrali si è scelta la parete "MCO05 - Muratura in blocchi pieni di calcestruzzo cellulare" (Figura 17).

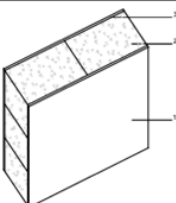
MCO05 - Muratura in blocchi pieni di calcestruzzo cellulare						
	Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg K)]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	1 Intonaco interno	1	1400	1000	0,700	-
	2 Blocchi pieni	24-40	500	1000	0,150	-
	3 Intonaco esterno	2	1800	1000	0,900	-
Descrizione (spessori in cm)	1 - 30 - 2		U [W/(m ² K)]		κ_i [kJ/(m ² K)]	Y_{ie} [W/(m ² K)]
			0,45		34,8	0,118

Figura 17 – stratigrafia pareti perimetrali

Utilizzando lo spessore dei blocchi interni pari a 30 cm quindi con una trasmittanza termica di 0,45 W/m²K.

Per pareti interne divisorie viene utilizzata una parete in laterizio forato da 10 cm intonacata su entrambi i lati con trasmittanza termica pari a 2 W/m²K (Figura 18).

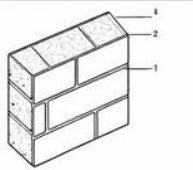
	Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg K)]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	1 Intonaco	1	1400	1000	0,700	-
	2 Laterizi forati	8-10	850	1000	0,400	-
	3 Intonaco	1	1400	1000	0,900	-
Descrizione (spessori in cm)	1 - 8/10 - 1		1,50			-

Figura 18 – Stratigrafia pareti interne

Copertura

Come copertura è stata scelta la “COP01” (Figura 19) per la semplicità costruttiva e bassa trasmittanza termica.

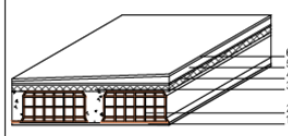
COP01 – Copertura piana non praticabile, esempio 1- [3]						
	Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg K)]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	1 Intonaco interno	2	1400	1000	0,700	-
	2 Soletta (blocchi di laterizio+travetti in calcestruzzo)	16 24	900	1000	-	0,330- 0,370 ⁹⁾
	3 Calcestruzzo armato	4	2400	1000		
	4 Malta di cemento	2	2000	1000		
	5 Massetto in calcestruzzo ordinario	2-12	2000	1000	1,060	-
6 Membrana impermeabilizzante bituminosa	1	1200	1000	0,170	-	
Descrizione (spessori in cm)	U [W/(m ² K)]		κ_i [kJ/(m ² K)]		Y_{ie} [W/(m ² K)]	
	Fl.ascend.	Fl.discend				
2 - 24 - 4 - 2 - 6 - 1	1,53	1,38				

Figura 19 – Stratigrafia copertura

Altre caratteristiche termiche

Il supermercato presenta un pavimento di 0,4 W/m²K composto da: una finitura in gres porcellanato, massetto per posa, CLS, isolante ad alta intensità e vespaio a contatto con il suolo esterno (Figura 20).

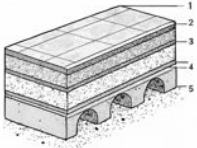
	Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	c [J/kg K]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	1 Piastre gres porcellanato	1,2	2300	900	1,300	0,009
	2 Massetto	5	2000	1000	1,400	0,036
	3 CLS	15	2300	1000	1,800	0,083
	4 Isolante alta densità	4	45	1250	0,035	1,143
	5 Vespaio aerato	20	600	1000	1,000	0,200
Descrizione (spessori in cm)	1,2 - 5 - 15 - 4 - 20	1,2 - 5 - 15 - 4 - 20				
	U [W/(m ² K)]		K _l [kJ/(m ² K)]		Y _{ie} [W/(V m ² K ³)]	
	0,40		125,3		0,137	

Figura 20 – Stratigrafia pavimento

Il supermercato prevede una grande vetrata sulla parete esposta a sud, due finestre nei bagni e spogliatoi e la porta d'ingresso è anch'essa in vetro. Per la composizione di queste finestre sono stati scelti dei doppi vetri con intercapedine d'aria, composti da vetri di spessore pari a 4 mm e intercapedine di 16 mm con trasmittanza totale pari a 2,72 W/m²K e infiltrazioni stimate pari a 0,5 vol/h (con vol. si intende il volume del supermercato).

Per le diverse funzioni delle varie porte presenti, sono state scelte le seguenti caratteristiche:

- Porte d'accesso in vetro con aggiunta di lama d'aria per diminuire le infiltrazioni;
- 3 porte antincendio in acciaio coibentato con spessore di 6 cm e trasmittanza di 3,6 W/m²K;
- Porta taglia fuoco tra magazzino e supermercato con spessore di 7 cm e trasmittanza di 3,96 W/m²K;
- Porte interne in legno con spessore di 4,5 cm e trasmittanza di 2,38 W/m²K.

Profili di occupazione

Come citato precedentemente sono stati stimati i profili di occupazione dell'intero supermercato (Tabella 4) (Tabella 5) per stimare i carichi interni.

Con orari di apertura: 08:00–21:00 dal lunedì al sabato e 09:00–20:00 la domenica il numero di lavoratori in contemporanea nel supermercato risulta il seguente:

- Mattina (8:00 – 10:00): 25 persone (preparazione, allestimento, pochi clienti).
- Fascia di punta (11:00 – 19:00): 45 persone contemporanee.
- Sera (19:00 – 21:00): 20 persone (riduzione casse e reparti freschi chiusi).

Il numero di clienti invece è stato valutato in base alle dimensioni di ogni zona interna arrivando a stimare un picco di 200 persone in contemporanea nel supermercato.

La densità di occupazione è stata così suddivisa per zone:

Zona	Densità
Ingresso	0,1 persone/m ²
Sala vendite	0,12 persone/m ²
Magazzino	0,08 persone/m ²
Locale tecnico	0,11 persone/m ²
Spogliatoio maschile	0,1 persone/m ²
Spogliatoio femminile	0,1 persone/m ²
Antibagno	0,13 persone/m ²
Bagno maschile	0,15 persone/m ²
Bagno disabili	0,23 persone/m ²
Bagno femminile	0,25 persone/m ²

Tabella 4 – Densità di occupazione per zona

Occupazione così suddivisa durante la giornata:

Ora del giorno	Fattore di occupazione	Descrizione
06:00–08:00	0,2	Apertura, pochi clienti, preparazione
08:00–10:00	0,4	Aumento graduale clientela
10:00–12:00	0,8	Afflusso consistente
12:00–14:00	1,0	Picco di affluenza (pausa pranzo)
14:00–17:00	0,6	Fase intermedia
17:00–20:00	1,0	Secondo picco (dopo lavoro)
20:00–22:00	0,5	Calo prima della chiusura
22:00–24:00	0,1	Chiusura, solo personale residuo
00:00–06:00	0,05	Notte, pulizie, riordino magazzino

Tabella 5 – Densità di occupazione oraria

Al fine di calcolare anche l’apporto termico portato da questo flusso di clienti e dipendenti è stato stimato il calore per persona da esse derivante (Tabella 6).

Attività	Calore totale (W/persona)	Sensibile (W)	Latente (W)
Cliente supermercato (attività leggera, camminare)	120–160 W	~75–100	~45–60
Dipendente (attività media, spostamento merci, riordino scaffali)	150–250 W	~100–160	~50–90
Cassa / attività sedentarie	100–120 W	~65–80	~35–40

Tabella 6 – Apporti termici

Come valori nel modello sono stati utilizzati:

- Clienti: 80 W sensibile, 50 W latente
- Dipendenti: 130 W sensibile, 60 W latente
- Cassa (picchi di 15 persone): 65 W sensibile, 35 W latente.

Tutti questi dati sono stati inseriti nel template Attività presente nel software DesignBuilder.

Ventilazione

Per i supermercati esistono varie norme che regolano la ventilazione da tenere all'interno dei locali. Nel modello la quantità di ventilazione voluta (Tabella 7) è stata inserita nei parametri del gruppo di zona dell'impianto HVAC che vedremo in seguito com'è strutturato.

Per una corretta ventilazione di ogni reparto sono stati utilizzati i seguenti dati.

Zona	Ventilazione
Ingresso	0,015 m ³ /s persona
Sala vendite	0,015 m ³ /s persona + 0,003 m ³ /s m ²
Magazzino	0,010 m ³ /s persona
Locale tecnico	0,015 m ³ /s persona
Spogliatoio maschile	0,015 m ³ /s persona
Spogliatoio femminile	0,015 m ³ /s persona
Antibagno	0,025 m ³ /s persona
Bagno maschile	0,040 m ³ /s persona
Bagno disabili	0,040 m ³ /s persona
Bagno femminile	0,040 m ³ /s persona

Tabella 7 – Ventilazione per zone

Questi dati fanno riferimento al numero di persone stimate grazie ai profili di occupazione (Tabella 4).

Illuminazione

L'illuminazione è molto importante all'interno del progetto sia per il benessere dei clienti sia per creare il giusto ambiente di lavoro per i dipendenti.

Come sopraccitato l'intera illuminazione è composta da LED e i dati di illuminazione (Tabella 8) sono stati inseriti nel template illuminazione per ogni zona in base ai lumen forniti da normativa.

Zona	Illuminazione
Ingresso	4,3 W/m ²
Sala vendite	5,0 W/m ²
Magazzino	3,6 W/m ²
Locale tecnico	3,6 W/m ²
Spogliatoio maschile	4,5 W/m ²
Spogliatoio femminile	4,5 W/m ²
Antibagno	4,5 W/m ²

Bagno maschile	4,5 W/m ²
Bagno disabili	4,5 W/m ²
Bagno femminile	4,5 W/m ²

Tabella 8 – Illuminazione per zone

Carichi prese

Questi dati sono stati valutati in base alle dimensioni del supermercato, risultano importanti in quanto, assieme alla refrigerazione, sono il motivo di maggior consumo elettrico e creano di fatto anche un consistente e costante apporto termico per ogni zona.

In un supermercato, questi carichi includono:

- Casse registratrici e terminali POS
- Apparecchiature per ufficio (computer, stampanti, server/rete)
- Apparecchiature per la preparazione/processo alimentare come forni, affettatrici, bilance, macchine da caffè, ecc.
- Attrezzature per la pulizia (idropulitrici, aspirapolvere)
- Apparecchiature di sicurezza (telecamere, allarmi)

Tutti questi apparecchi nel software vengono inseriti nel template attività sotto la voce computer con valori che varia in base alla zona interna.

Questi carichi (Tabella 9) sono la potenza elettrica che entra come carico termico interno sensibile nel calcolo della climatizzazione (HVAC), contribuendo a riscaldare l'ambiente, specialmente nelle ore di maggiore affluenza.

Zona	Carico
Ingresso	0,3 W/m ²
Sala vendite	5,0 W/m ²
Magazzino	2,5 W/m ²
Locale tecnico	4,2 W/m ²
Spogliatoio maschile	4,5 W/m ²
Spogliatoio femminile	4,5 W/m ²
Antibagno	0 W/m ²
Bagno maschile	0,1 W/m ²
Bagno disabili	0,1 W/m ²
Bagno femminile	0,1 W/m ²

Tabella 9 – Carico elettrico per zone

Refrigerazione

Questa è la voce che più contribuisce ai consumi energetici di un supermercato. Per stimare questi consumi come prima cosa è stata svolta una ricerca sui dati di consumo medi di alcuni macchinari presenti nei cataloghi digitali dei rivenditori di settore al momento della ricerca creando la tabella sottostante (Tabella 10).

Tipo di Attrezzatura	Consumo stimato (ore di funzionamento giornaliero)	Note
Banco frigo (Aperto) Altezza 2 m Lunghezza 1,20 m Profondità 0,80 m Tot 1920 litri	12.775 kWh/anno 35 kWh/d (24 h/d) 1,46 kWh	Le vetrine aperte disperdono enormi quantità di freddo nell'ambiente, risultando il consumo più alto.
Banco frigo (Chiuso) Altezza 2 m Lunghezza 1,20 m Profondità 0,80 m Tot 1920 litri	4.588 kWh/anno 12,6 kWh/d (24 h/d) 0,53 kWh	La chiusura (porte o coperchi) può portare a un risparmio energetico fino al 60 % rispetto al modello aperto equivalente.
Macchina congelatore Altezza 0,8 m Lunghezza 2 m Profondità 0,8 m Tot 1280 litri	1.260 kWh/anno 3,5 kWh/d (15 h/d) 0,23 kWh	I pozzetti orizzontali (se chiusi) sono generalmente più efficienti dei verticali perché l'aria fredda non "cade" fuori all'apertura.
Banco espositore Freddo Altezza 0,7 m Larghezza 0,8 m Profondità 0,6 m Tot 330 litri	855 kWh/anno 2,34 kWh/d (18 h/d) 0,13 kWh	Si tratta di unità più piccole (da banco) e con minori carichi da raffreddare rispetto ai grandi banchi murali.
Macchina per il ghiaccio Con produzione media di 45 kg/giorno	1.752 kWh/anno 4,8 kWh/d (20 h/d) 0,24 kWh	Il consumo dipende dalla capacità produttiva e dal sistema di raffreddamento (aria o acqua).
Cella frigorifera Volume 10 m ³	4.600 kWh/anno 12,6 kWh/d (18 h/d) 0,70 kWh	Per una cella frigorifera con temperatura: 0°C/+5°C

Tabella 10 – Consumi macchine refrigeranti

Per il modello vengono stimati i numeri di componenti per calcolare il consumo da inserire nel software DesignBuilder (Tabella 11).

Macchinario	Numero	Consumi
Banco frigo aperto	10	127.750 kWh/anno 350 kWh/d 14,6 kWh
Banco frigo chiuso	15	68.820 kWh/anno 189 kWh/d 7,95 kWh

Freezer	10	12.600 kWh/anno 35 kWh/d 2,3 kWh
Banco espositore freddo	10	8.550 kWh/anno 23,40 kWh/d 1,3 kWh
Macchina per il ghiaccio	2	3.500 kWh/anno 9,6 kWh/d 0,48 kWh
Cella frigorifera	5	23.000 kWh/anno 63 kWh/d 3,5 kWh
TOTALE		244.220 kWh/anno 670 kWh/d 30,13 kWh

Tabella 11 – Quantità e consumi delle macchine refrigeranti installate

Questi dati di consumo sono stati riportati nel template attività alla voce “varie” della sola sala vendita essendo tutti i macchinari presenti in questo ambiente. Il consumo specifico per refrigerazione sulla reale superficie della sala vendite (1627,14 m²) risulta pari a 150,1 kWh/ m² anno.

9.2.1. ELABORAZIONE DI DATABASE DI DATI METEO

Questo modello verrà posizionato in più zone d’Italia per capire e confrontare il suo funzionamento in diverse condizioni climatiche. Dato che i dati meteo del software DesignBuilder si riferiscono all’anno 2002 sono stati elaborati delle serie di dati più recenti.

Per la costruzione dei file climatici utilizzati nelle simulazioni energetiche è stato adottato l’Anno Climatico Tipo di Riferimento (Typical Reference Year – TRY), messo a disposizione dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) tramite il portale CTI2000.¹⁰⁰

Un anno climatico tipo non rappresenta un anno reale specifico, ma una sequenza temporale artificiale che riproduce in modo statisticamente rappresentativo le condizioni climatiche medie di lungo periodo di una determinata località. L’obiettivo del TRY è fornire una base di calcolo standardizzata e riproducibile per le analisi termotecniche ed energetiche degli edifici, evitando l’uso di singole annate reali che potrebbero risultare anomale o non rappresentative.

Gli anni climatici tipo forniti dal CTI costituiscono la base di calcolo ufficiale utilizzata per l’aggiornamento della norma UNI 10349.¹⁰¹

Procedura di calcolo degli anni climatici tipo CTI

Gli anni climatici tipo sono stati elaborati secondo la procedura descritta nella norma UNI EN ISO 15927-4¹⁰², che definisce il metodo per la costruzione di anni meteorologici rappresentativi a partire da serie storiche di dati misurati.

La metodologia adottata dal CTI può essere sintetizzata come segue:

- per ciascuna località sono state raccolte serie storiche di dati meteorologici reali, provenienti da stazioni di misura ufficiali, riferite a un periodo temporale preferibilmente superiore a dieci anni;
- per ogni mese dell'anno sono stati individuati i mesi più rappresentativi dal punto di vista statistico rispetto alle medie climatiche di lungo periodo;
- i dodici mesi selezionati, appartenenti anche ad anni diversi, sono stati assemblati per formare un unico anno climatico tipo;
- sono state applicate correzioni nei punti di transizione tra un mese e l'altro, al fine di garantire la continuità delle grandezze climatiche e la coerenza delle sequenze temporali.

Il risultato è un anno artificiale che mantiene dinamiche realistiche delle variabili climatiche, come le variazioni orarie e giornaliere, la persistenza delle condizioni meteorologiche su più giorni consecutivi e la correlazione fisica tra i diversi parametri, in particolare tra temperatura dell'aria e irradianza solare globale.

Parametri climatici e rappresentatività dei dati

Gli anni climatici tipo CTI rappresentano i valori medi di lungo periodo dei principali parametri climatici rilevanti per le applicazioni energetiche, tra cui:

- temperatura dell'aria [$^{\circ}\text{C}$];
- umidità relativa [%];
- irradianza solare globale sul piano orizzontale [W/m^2];
- velocità del vento [m/s].

Le serie climatiche sono state elaborate per 110 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio nazionale, utilizzando dati forniti da enti istituzionali regionali (ARPA, servizi agrometeorologici e idrografici), ENEA e altri organismi pubblici. Questo garantisce un elevato livello di affidabilità, tracciabilità e omogeneità dei dati utilizzati.

I file climatici sono resi disponibili in formato elettronico con risoluzione oraria, risultando particolarmente adatti all'impiego nei software di simulazione energetica dinamica e nelle analisi di prestazione degli edifici.

Analisi e commento dei dati meteorologici regionali

In questo paragrafo vengono analizzate le dinamiche meteorologiche rilevate nelle tre città italiane di riferimento. I dati analizzati coprono un intero anno solare e permettono di evidenziare le profonde differenze termiche, igrometriche e anemometriche del territorio nazionale.

Profilo termico

L'analisi delle temperature medie giornaliere evidenzia il classico gradiente climatico italiano.

Milano (Grafico 6) presenta il clima più rigido del campione, con medie invernali che a gennaio e dicembre scendono rispettivamente a $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La sua natura

continentale è evidente anche nell'escursione termica stagionale, con un picco di temperatura estivo di 33 °C a luglio. E media annua di 14,3 °C.

Mentre entrambe le stazioni di Roma (Grafico 7) e Bari (Grafico 8) mostrano una notevole mitezza invernale, non scendendo mai sotto gli 8 °C di media mensile. Con un picco massimo di temperatura rispettivamente di 37,3 °C e 38,1 °C. Nel dataset analizzato Roma presenta una temperatura media annuale leggermente superiore (16,6 °C) rispetto a Bari (16,2 °C), a causa di una maggiore persistenza di ondate di calore estive.

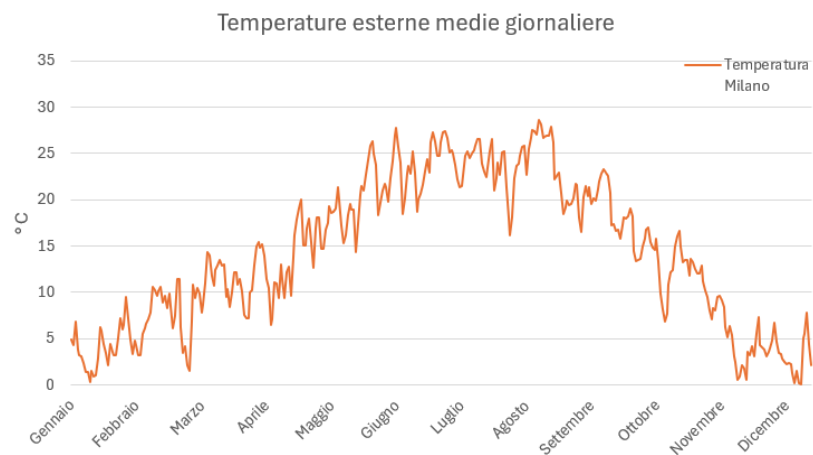


Grafico 6 – Temperature esterne medie giornaliere a Milano

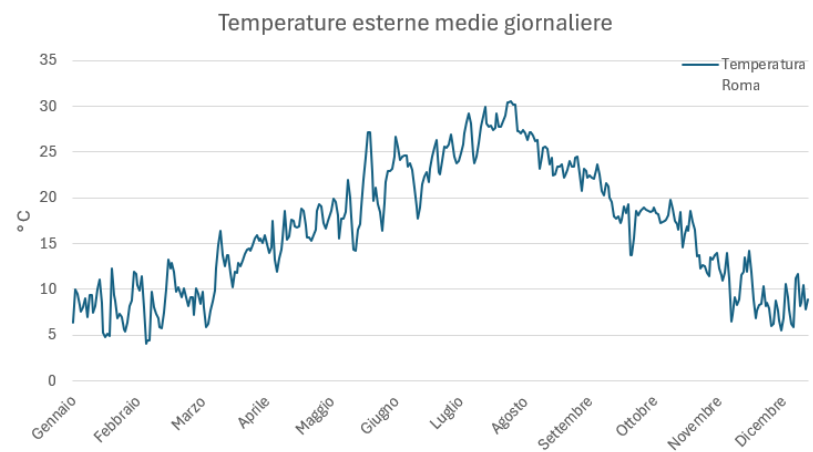


Grafico 7 – Temperature esterne medie giornaliere a Roma

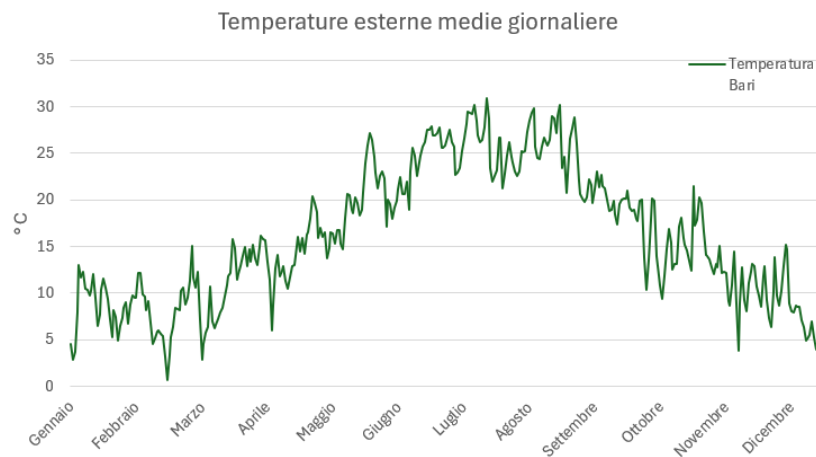


Grafico 8 – Temperature esterne medie giornaliere a Bari

Umidità e irradianza

Un dato di grande interesse riguarda l'umidità relativa e la radiazione solare, fattori chiave per studi agronomici o energetici.

Milano presenta un'umidità relativa media annuale (Grafico 9) del 70,3% mentre Roma (Grafico 10) del 67,2% e Bari (Grafico 11) del 65,8%.

Parlando invece di irradianza solare globale sul piano orizzontale si osservano i seguenti valori medi annuali: Milano (Grafico 12) 281,7 W/m², Roma (Grafico 13) 326,1 W/m² e Bari (Grafico 14) 309,7 W/m².

L'umidità relativa conferma Milano come l'area più umida del gruppo, tipico della stagnazione atmosferica della Pianura Padana. Al contrario, Bari risulta la più secca (65,8%), beneficiando di una ventilazione più costante. Per quanto riguarda l'irradianza, Roma registra il valore più alto, superando anche Bari; questo dato suggerisce una minore copertura nuvolosa media nell'area laziale analizzata rispetto alle altre due regioni durante l'anno di riferimento.

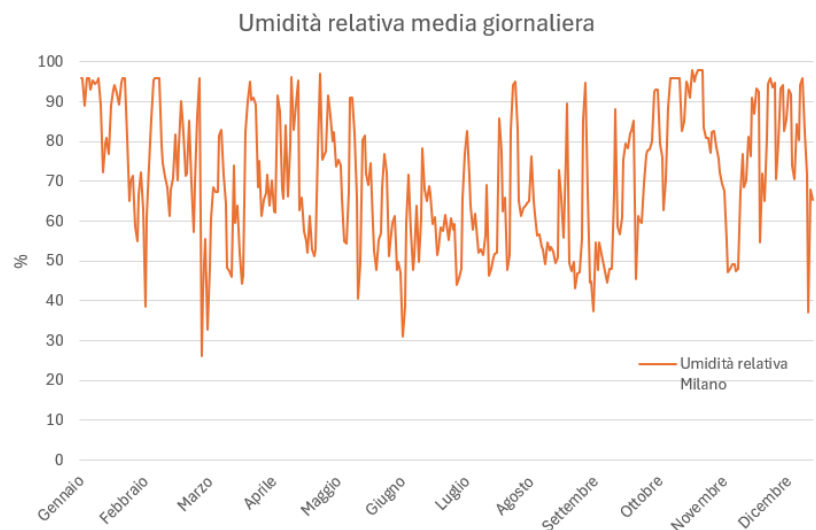


Grafico 9 – Umidità relativa media giornaliera a Milano

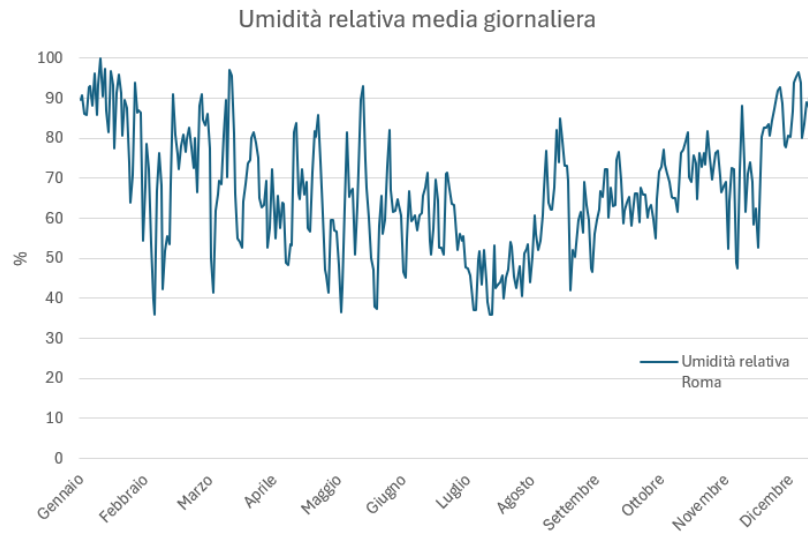


Grafico 10 – Umidità relativa media giornaliera a Roma

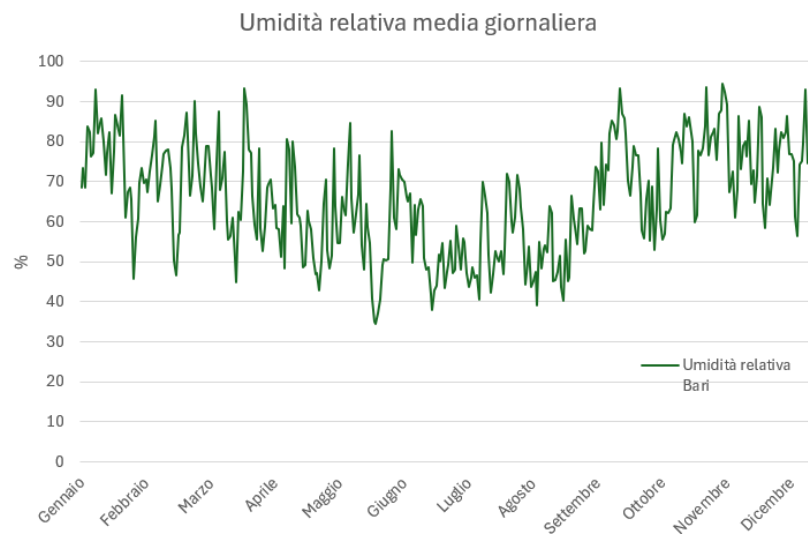


Grafico 11 – Umidità relativa media giornaliera a Bari

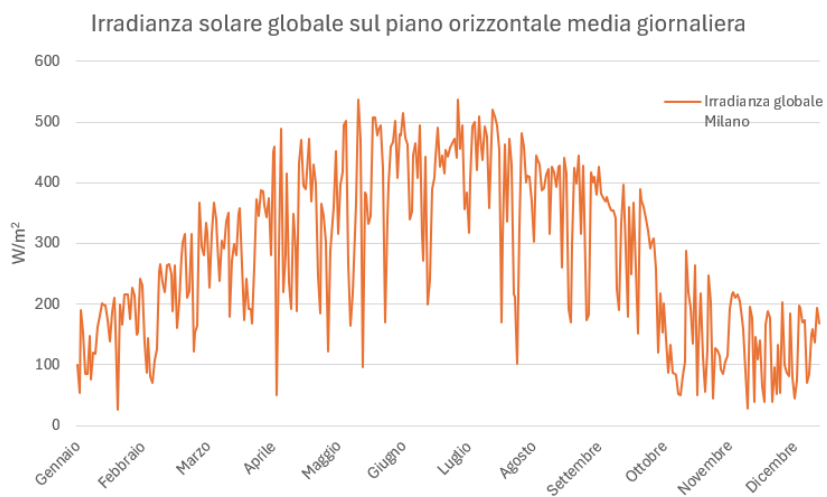


Grafico 12 – Irradianza solare globale sul piano orizzontale media giornaliera a Milano

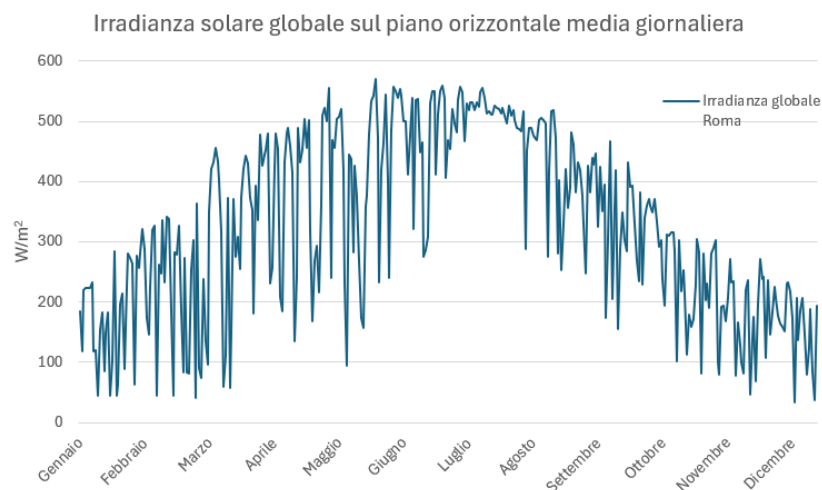


Grafico 13 – Irradianza solare globale sul piano orizzontale media giornaliera a Roma

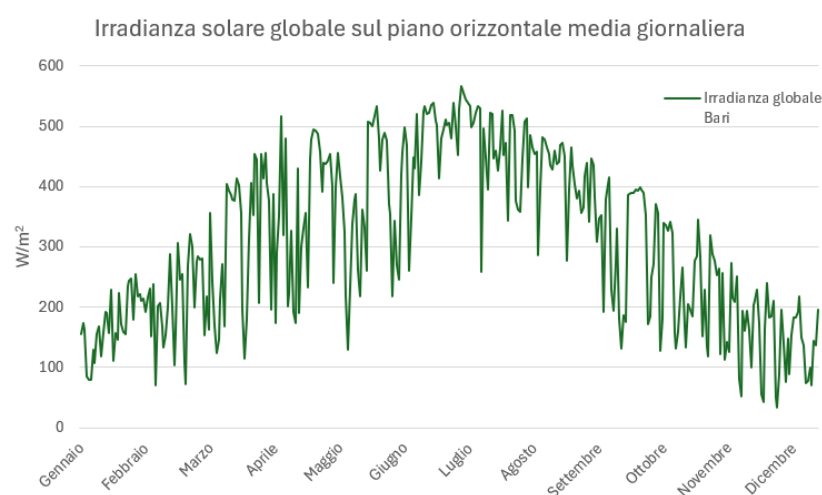


Grafico 14 – Irradianza solare globale sul piano orizzontale media giornaliera a Bari

Il regime dei venti

La differenza più marcata tra le tre regioni emerge dall'analisi della velocità del vento: Bari (Grafico 17) si distingue nettamente con una velocità media annuale di 9,7 km/h, circa il 60% in più rispetto a Milano (Grafico 15) (6,1 km/h) e a Roma (Grafico 16) (6,1 km/h).

Questa spiccata ventosità di Bari è riconducibile alla sua esposizione costiera sull'Adriatico, soggetta a correnti frequenti, a differenza della stazione milanese che risente del tipico regime di calma di vento delle aree prealpine.

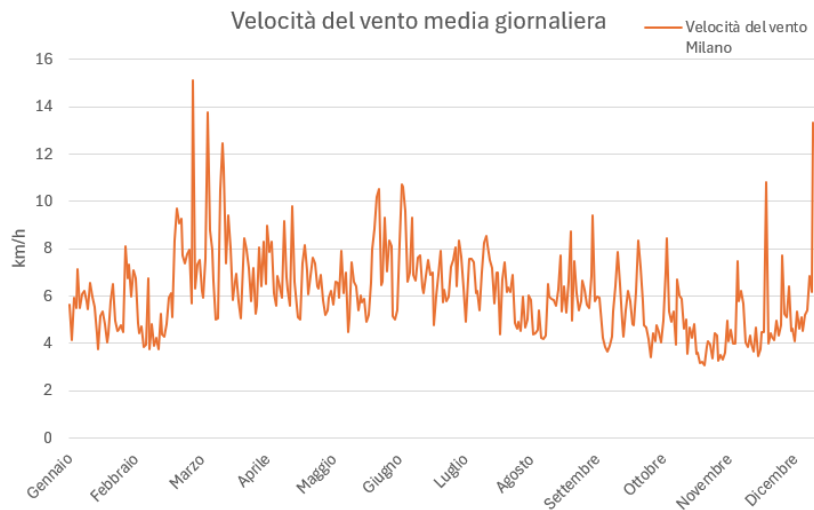


Grafico 15 – Velocità del vento media giornaliera a Milano

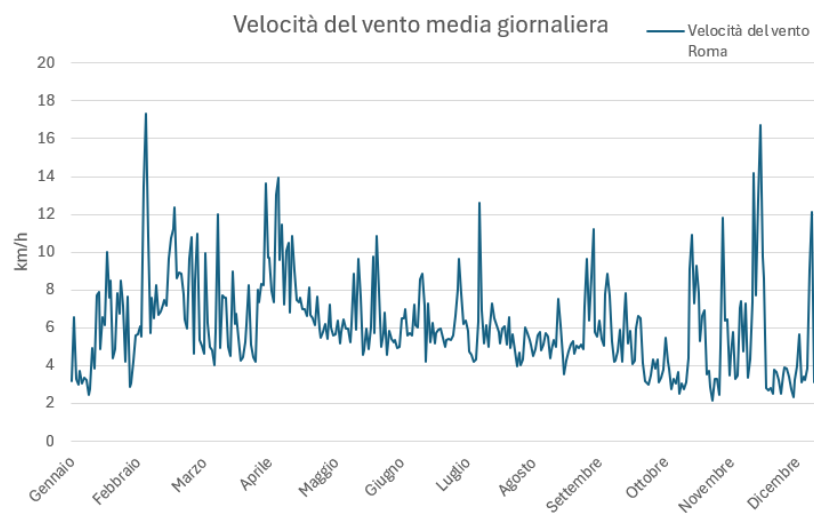


Grafico 16 – Velocità del vento media giornaliera a Roma

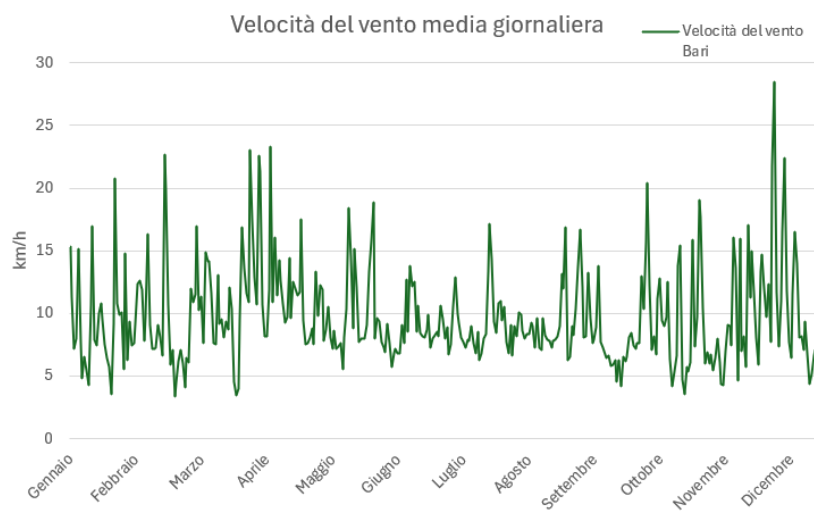


Grafico 17 – Velocità del vento media giornaliera a Bari

Punto di rugiada

Il punto di rugiada (Dew Point), come abbiamo visto, rappresenta la temperatura alla quale l'aria dovrebbe essere raffreddata per raggiungere la saturazione. E viene calcolato con la Formula di Magnus-Tetens.

$$D_p = \frac{c * y(T, R_H)}{b - y(T, R_H)}$$

Dove la funzione ausiliaria $y(T, R_H)$ è definita come:

$$y(T, R_H) = \ln\left(\frac{R_H}{100}\right) + \frac{b * T}{c + T}$$

Dove:

- T: Temperatura dell'aria esterna in gradi Celsius (°C).
- R_H : Umidità relativa espressa in percentuale.
- b e c: Costanti di Magnus. Per temperature superiori a 0 °C, i valori standard utilizzati dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) sono solitamente $b = 17,625$ e $c = 243,04$ °C.

Se l'umidità relativa R_H è superiore al 50%, può essere utilizzata formula mnemonica molto semplice che sbaglia di circa ± 1 °C

$$D_p = T - \frac{100 - R_H}{5}$$

Dal confronto tra le tre stazioni emergono dati significativi sulla qualità dell'aria e sulla percezione del calore:

- Roma (Grafico 19) (9,71 °C): Registra il valore medio annuo più elevato. Questo indica che le masse d'aria presenti nell'area tirrenica centrale hanno un contenuto di vapore acqueo assoluto maggiore rispetto alle altre stazioni. Durante i mesi estivi (luglio e agosto), l'elevato punto di rugiada, combinato con temperature medie sopra i 26 °C, suggerisce una frequente esposizione a condizioni di disagio bioclimatico (afa).
- Bari (Grafico 20) (8,99 °C): Nonostante la posizione costiera, Bari presenta un punto di rugiada intermedio. Questo valore, incrociato con l'alta ventosità precedentemente analizzata, conferma una migliore circolazione dell'aria che impedisce il ristagno dell'umidità, mantenendo l'aria mediamente più "secca" in termini assoluti rispetto al Lazio.
- Milano (Grafico 18) (8,09 °C): Mostra il punto di rugiada più basso del campione. Sebbene Milano abbia l'umidità relativa più alta (70,3%), il dato del punto di rugiada ci svela la realtà fisica: l'aria a Milano contiene meno vapore acqueo totale perchè è molto più fredda. In inverno, i valori di dew point prossimi o inferiori allo zero sono i diretti responsabili della formazione di brina e nebbie fitte per irraggiamento, tipiche della Pianura Padana.

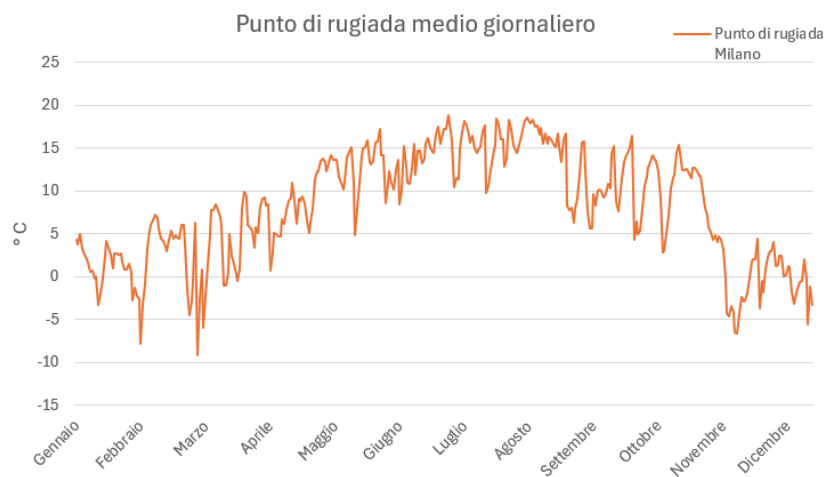


Grafico 18 – Punto di rugiada medio giornaliero a Milano

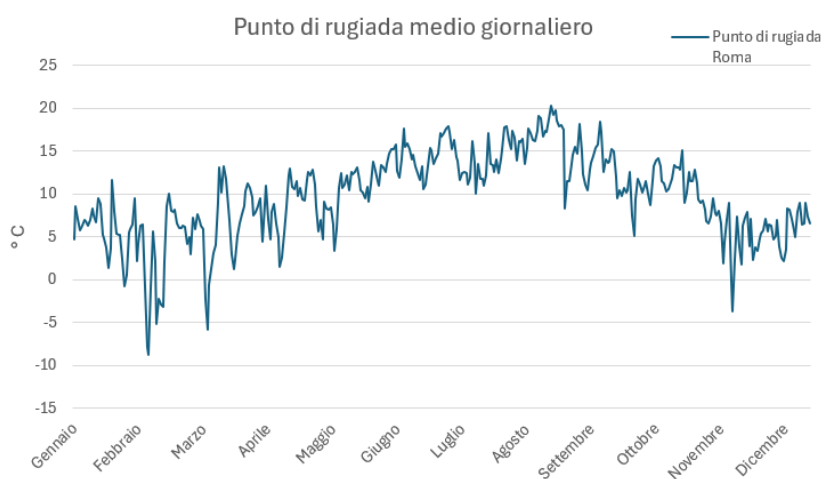


Grafico 19 – Punto di rugiada medio giornaliero a Roma

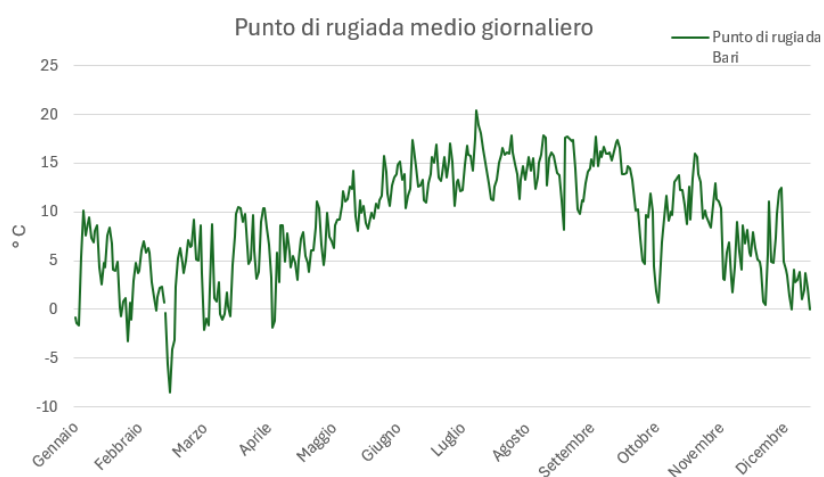


Grafico 20 – Punto di rugiada medio giornaliero a Bari

Considerazioni climatiche

Dal confronto dei dati emerge una chiara tripartizione: il Nord (Milano) caratterizzato da freddo invernale e alta umidità; il Centro (Roma) che si distingue per la massima disponibilità di radiazione solare e temperature miti; e il Sud (Bari) che, pur avendo

temperature simili al Centro, è caratterizzato da un regime anemometrico (vento) molto più energetico e da un'aria mediamente più secca.

Motivazioni dell'utilizzo del TRY nelle simulazioni energetiche

L'utilizzo dell'anno climatico tipo consente di:

- rappresentare in modo coerente e confrontabile il clima di una località;
- evitare distorsioni legate a eventi meteorologici eccezionali;
- garantire la riproducibilità dei risultati delle simulazioni;
- allineare le analisi alle normative tecniche nazionali vigenti.

Per questi motivi, i dati climatici TRY forniti dal CTI sono oggi considerati il riferimento ufficiale per le applicazioni termotecniche e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici in ambito nazionale.

Creazione database su DesignBuilder

Per il nostro modello sono stati creati tre database di tre differenti zone italiane: Milano, Roma e Bari. Una volta scaricati i file TRY corrispondenti alle tre località i dati presenti in essi sono stati trasferiti nel software "Elements" creando i tre file meteo con le informazioni relative a:

- latitudine, longitudine e altitudine della località;
- temperatura dell'aria a bulbo asciutto [°C];
- temperatura dell'aria a bulbo bagnato [°C];
- pressione atmosferica [kPa];
- umidità relativa [%];
- punto di rugiada [°C];
- irradianza solare globale, normale e diffusa [W/m²];
- velocità del vento [m/s].

I dati che non sono presenti nei file del CTI vengono calcolati dal programma stesso.

Per creare dei database nel programma DesignBuilder si sono dovuti convertire questi tre file attraverso il software "Weather statistics and conversions".

Una volta creati questi tre file meteo relativi alle tre diverse zone scelte (Milano, Roma, Bari) il modello è stato simulato per ognuna di queste zone e i risultati verranno confrontati nei capitoli successivi.

9.3. MODELLAZIONE DELL'EDIFICIO E DEL SISTEMA HVAC

Successivamente all'analisi dei dati sopra riportati, il file AutoCAD è stato importato nel software DesignBuilder, all'interno del quale è stato sviluppato il modello tridimensionale del supermercato (Figura 21) (Figura 22), utilizzando i materiali precedentemente descritti.

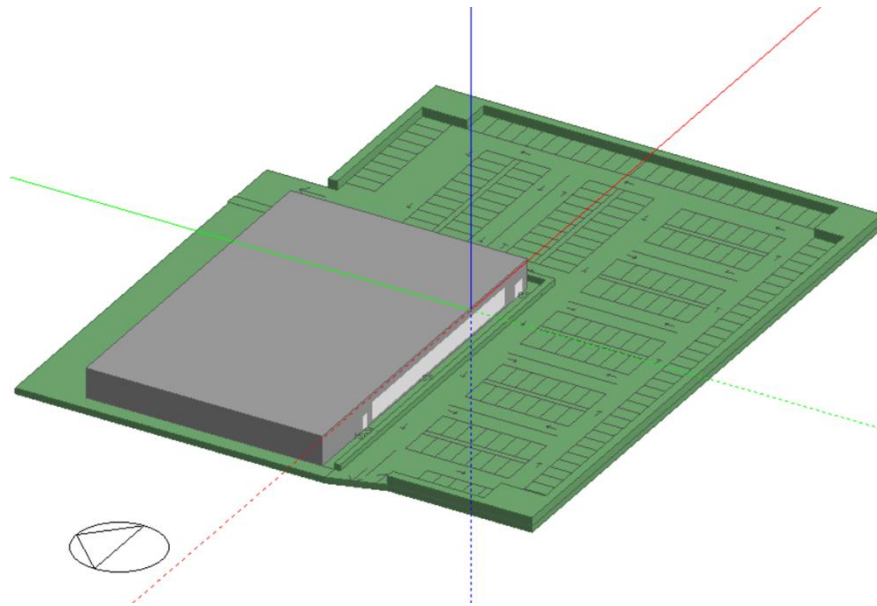


Figura 21 – Supermercato modellato su DesignBuilder

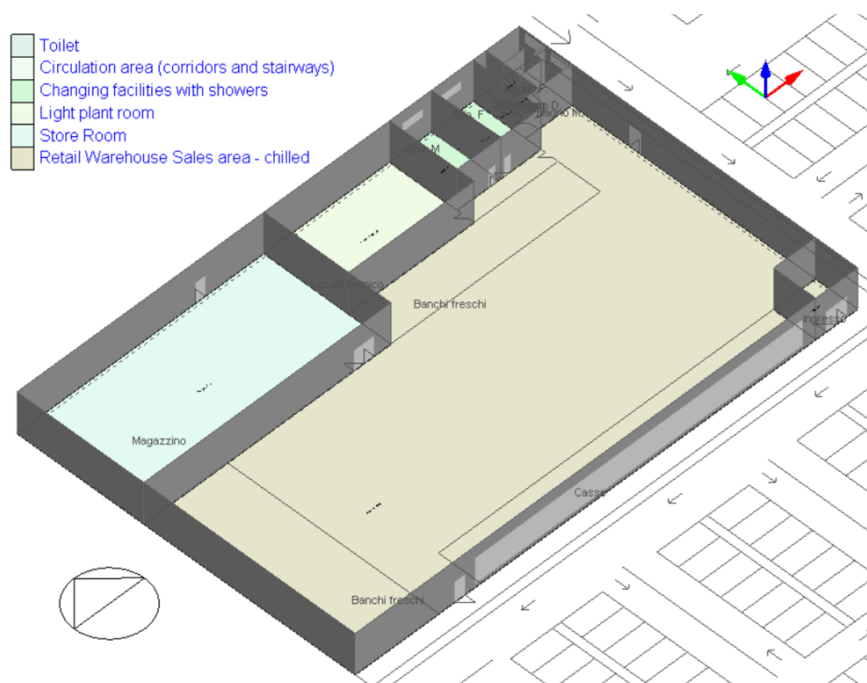


Figura 22 – Vista interna del supermercato su DesignBuilder

HVAC (Figura 23)

L'edificio oggetto di studio è servito da un impianto HVAC centralizzato modellato interamente in ambiente DesignBuilder, costituito da sistemi per la climatizzazione invernale ed estiva, la ventilazione meccanica controllata e la distribuzione dell'aria ai diversi ambienti.

La scelta di questo sistema HVAC è motivata dalla necessità di gestire carichi termici elevati e variabili, tipici degli edifici commerciali, garantendo al contempo un adeguato controllo dell'umidità interna.

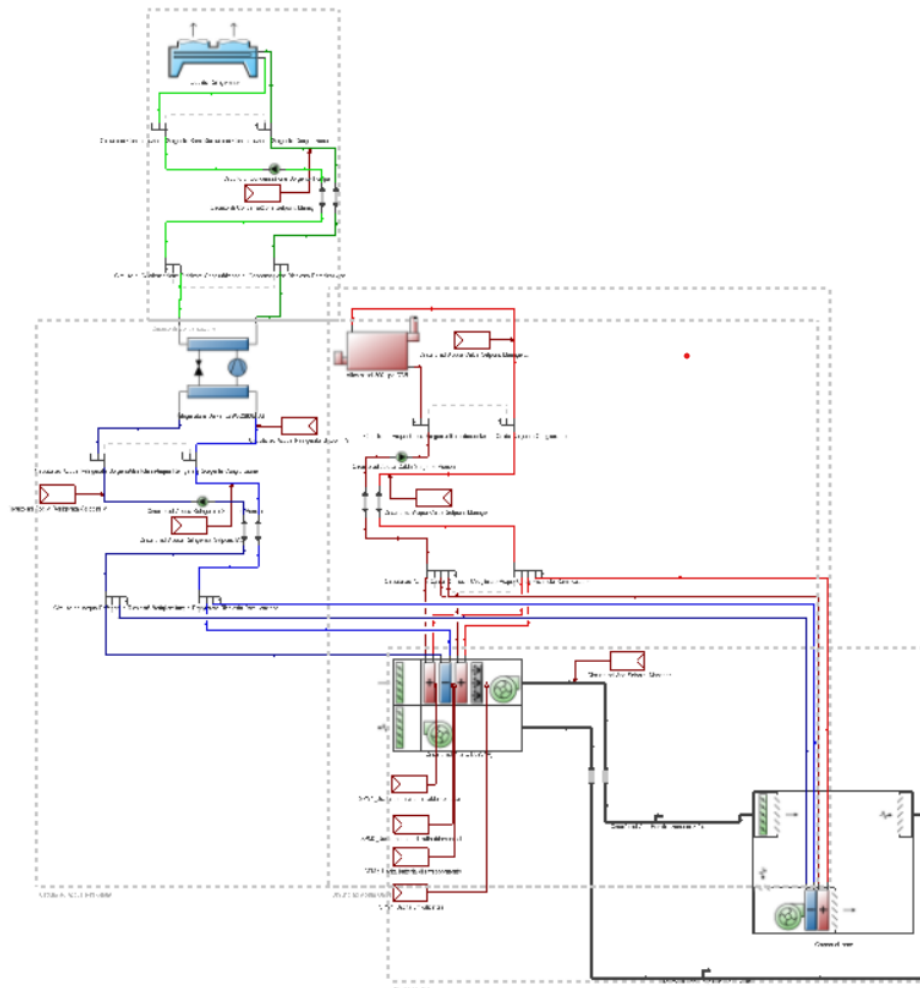


Figura 23 – Schema completo dell'impianto HVAC

L'impianto è organizzato in:

- **Sistema HVAC centrale**, che comprende:
 - **circuito ad acqua calda (Figura 24)**,

Questo circuito trasporta acqua calda dalla caldaia alle batterie di riscaldamento all'interno dell'Unità di Trattamento Aria (UTA) e all'interno delle unità di circolazione forzata presenti in ogni zona.

Il componente principale del circuito di generazione termica è rappresentato da una caldaia a condensazione ad alta efficienza. A differenza dei generatori tradizionali,

questa unità permette di recuperare il calore latente di condensazione del vapore acqueo contenuto nei fumi di scarico.

Il fluido termovettore (acqua) circola nel "Circuito ad Acqua Calda Lato Sorgente". La pompa di circolazione modula la portata in base alla richiesta delle batterie dell'UTA. Il Setpoint Manager, regola la temperatura di mandata non in modo fisso, ma seguendo una logica climatica: l'obiettivo è mantenere la temperatura di ritorno il più bassa possibile per massimizzare la condensazione e, di conseguenza, l'efficienza stagionale del sistema. Questo calore viene poi convogliato verso il collettore di distribuzione, che alimenta le diverse utenze termiche del sistema.

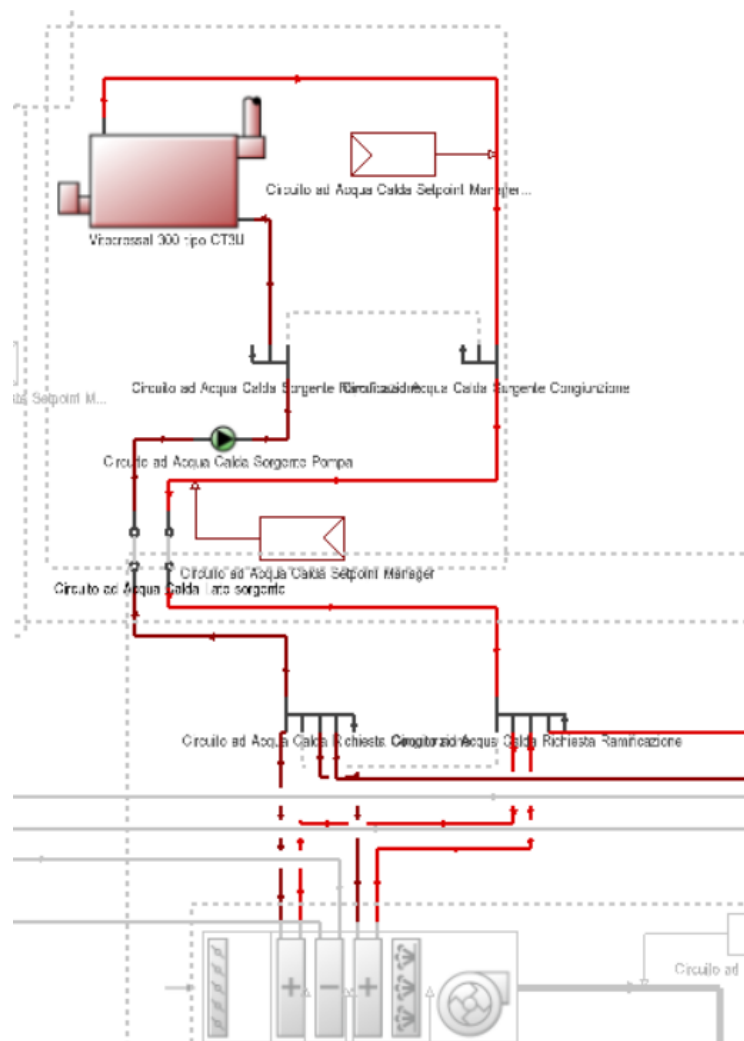


Figura 24 – Circuito acqua calda

○ **circuito ad acqua refrigerata (Figura 25),**

Il refrigeratore produce acqua fredda che viene inviata alla batteria di raffreddamento dell'UTA e all'interno delle unità di circolazione forzata per la deumidificazione e il raffrescamento dell'aria. Il circuito è di tipo chiuso, dove la pompa assicura che il salto termico tra mandata e ritorno rimanga entro i limiti di progetto per massimizzare l'EER (Energy Efficiency Ratio) della macchina.

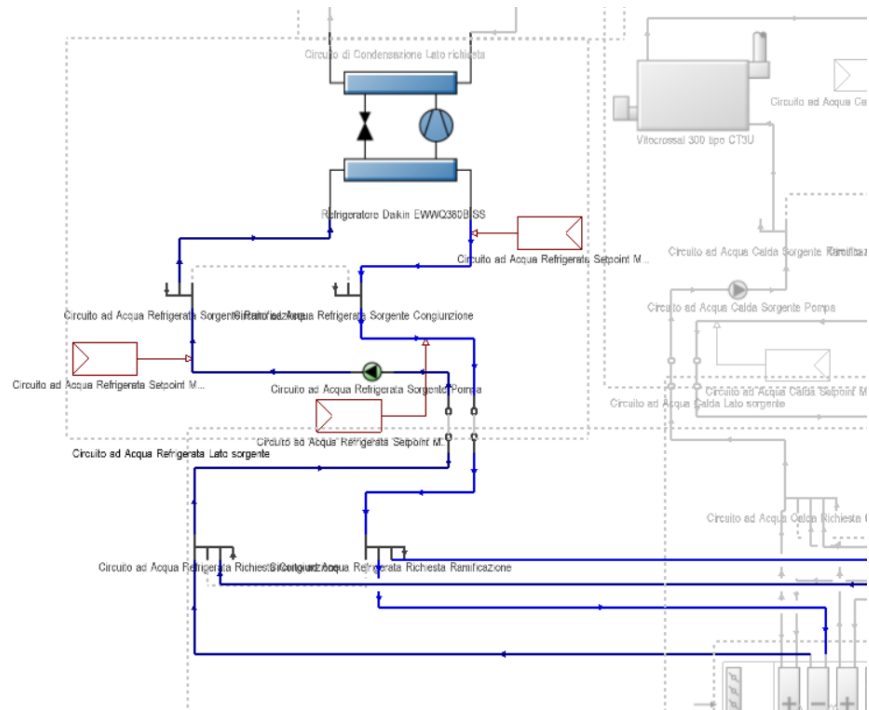


Figura 25 – Circuito acqua refrigerata

- **circuito di raffreddamento (Figura 26),**

Il fluido termovettore (miscela di acqua e glicole per evitare il congelamento invernale) circola all'interno di una batteria a pacco alettato senza mai entrare in contatto diretto con l'aria esterna. Questo garantisce che il circuito rimanga pulito, privo di incrostazioni calcaree e non richieda un continuo reintegro d'acqua.

I ventilatori sono l'elemento attivo del sistema. Essi forzano l'aria esterna attraverso le alette dello scambiatore, operando uno scambio di calore sensibile. La velocità di questi ventilatori è modulata per mantenere la temperatura del liquido in uscita al setpoint desiderato, ottimizzando il consumo elettrico in base alla temperatura dell'aria esterna.

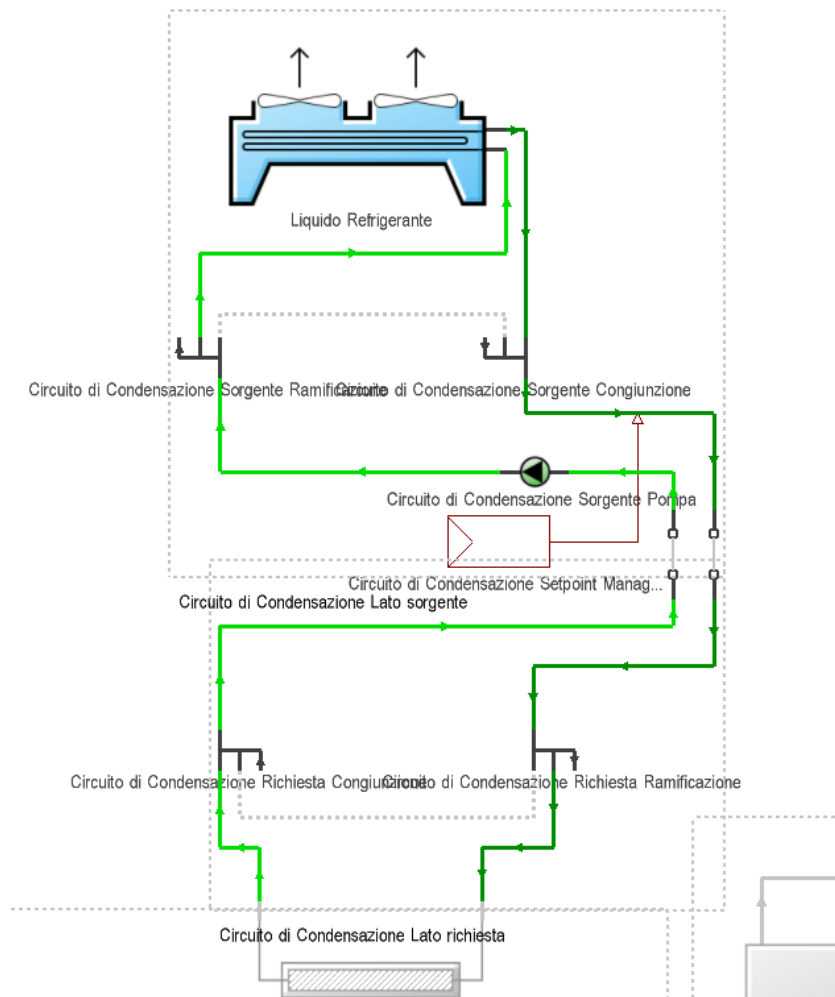


Figura 26 – Circuito di raffreddamento

○ **circuito aria (Figura 27);**

L'UTA rappresentata è un sistema a Portata d'Aria Variabile (VAV). È qui che avviene la trasformazione termofisica dell'aria primaria prima che venga immessa negli ambienti.

L'aria esterna viene aspirata e filtrata per rimuovere gli inquinanti. Successivamente, incontra una serie di scambiatori in linea:

- Batterie di preriscaldamento e raffreddamento: gestiscono il carico sensibile e latente primario.
- L'umidificatore: fondamentale nei mesi invernali per contrastare l'eccessiva secchezza dell'aria dovuta al riscaldamento.
- Il ventilatore a giri variabili: è l'elemento distintivo del sistema VAV. Invece di fornire sempre la stessa quantità di aria, il ventilatore modula la sua velocità in base alla pressione statica nei condotti.

Questa strategia è fondamentale per il risparmio energetico; quando il carico termico in una zona diminuisce, le serrande VAV si chiudono parzialmente e il ventilatore rallenta, riducendo esponenzialmente il consumo elettrico.

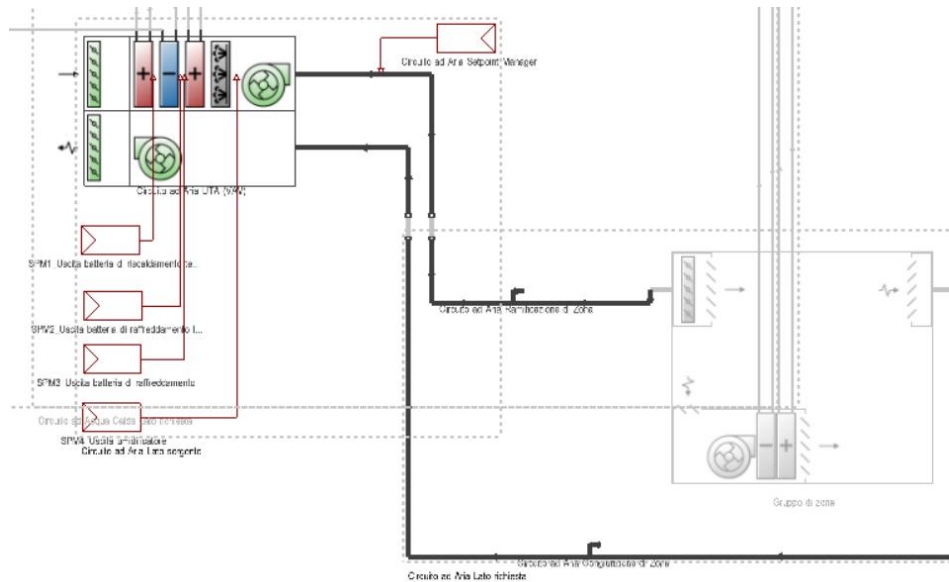


Figura 27 – Circuito aria

- **Gruppo di zone (Figura 28).**

La generazione dei vettori energetici e la distribuzione sono centralizzate, mentre il controllo avviene a livello di singola zona.

In un sistema a portata d'aria variabile (VAV), ogni singola zona non riceve un flusso d'aria costante. All'ingresso di ogni zona è presente una serranda motorizzata comandata da un termostato locale. Se la temperatura in una zona sale, la serranda di quella zona si apre per immettere più aria fresca. Questo approccio permette al ventilatore dell'UTA di rallentare quando la somma delle richieste delle zone diminuisce.

In ogni zona è presente un'unità di circolazione forzata le quali permettono di mantenere la temperatura costante durante tutta la giornata, in esse sono presenti una batteria di riscaldamento collegata alla caldaia e una di raffreddamento collegata al chiller.

Grazie al condotto di ritorno l'aria esausta viene ripresa dagli ambienti e riportata verso l'unità centrale. Questo permette di implementare l'uso di aria esterna per il raffreddamento e la miscelazione, riducendo il carico di lavoro sui generatori termici e frigoriferi, poiché l'aria di ricircolo è spesso già più vicina alle condizioni di comfort rispetto all'aria esterna pura.

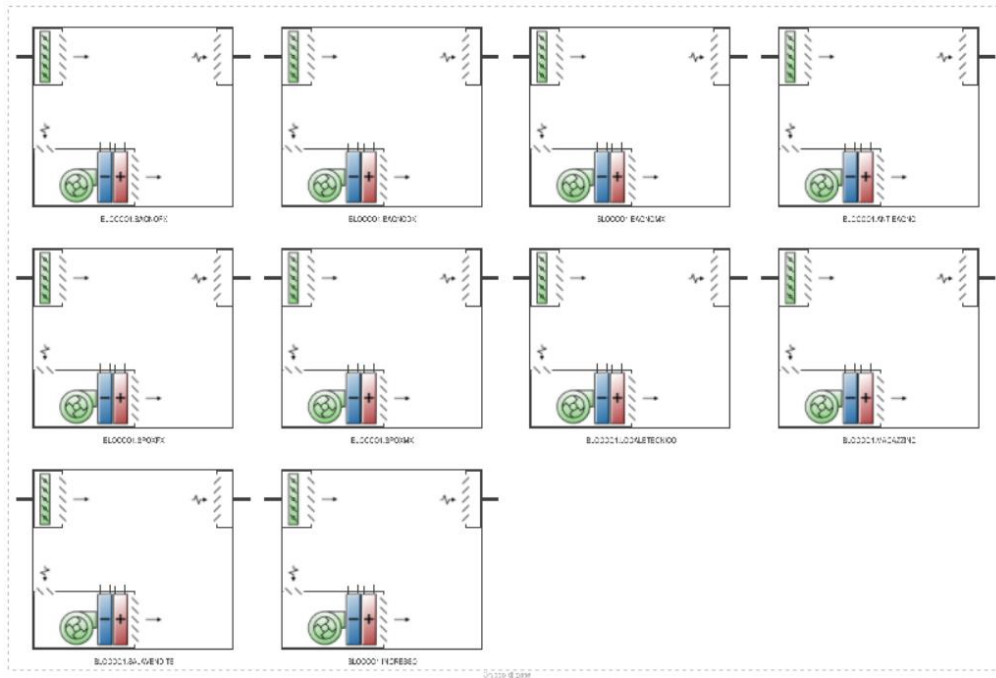


Figura 28 – Gruppo di zone

Sistema di generazione

Produzione di acqua calda

Il fabbisogno termico invernale è coperto da una sola caldaia a condensazione della Viessmann, il modello “VITOCROSSAL 300 CT3U” (Figura 29) ¹⁰³, aventi le seguenti caratteristiche (Figura 30):



VITOCROSSAL 300 Tipo CT3U

Caldaia a gas a condensazione per gas metano
Con bruciatore modulante cilindrico Matrix

Figura 29 – Caldaia installata – Catalogo Viessman

Dati tecnici caldaia

Dati tecnici

Potenzialità utile		
$P_{cond}: T_V/T_R = 50/30 \text{ °C}$	kW	da 209 a 630
$P_{in}: T_V/T_R = 80/60 \text{ °C}$	kW	da 192 a 575
Potenzialità al focolare per riscaldamento	kW	da 198 a 593
Marchio CE		
Temperatura max. d'esercizio	°C	95
Temperatura max. di mandata (= temperatura di sicurezza)	°C	110
Pressione max. d'esercizio	bar MPa	5,5 0,55
Dimensioni d'ingombro corpo caldaia		
Lunghezza (misura a)	mm	1450
Larghezza senza portina caldaia	mm	805
Larghezza con portina caldaia	mm	845
Altezza (con attacchi)	mm	1942
Dimensioni d'ingombro totali		
Altezza totale con rivestimento bruciatore (misura b)	mm	1960
Larghezza totale con regolazione	mm	1221
Altezza totale	mm	1987
Basamento		
Lunghezza	mm	1500
Larghezza	mm	900
Altezza	mm	100
Peso		
– Corpo caldaia	kg	755
Peso complessivo		
– Caldaia con bruciatore, isolamento termico e regolazione – circuito di caldaia	kg	935
Contenuto acqua di caldaia	Litri	406
Attacchi caldaia		
Mandata caldaia	PN 6 DN	100
Ritorno caldaia 1 [°]	PN 6 DN	100
Ritorno caldaia 2 [°]	PN 6 DN	80
Attacco di sicurezza (valvola di sicurezza) (filetto maschio)	R	1½
Scarico (filetto maschio)	R	1
Scarico condensa scatola fumi/sifone	Ø mm	32/20
Gas di scarico²		
Temperatura (con una temperatura del ritorno di 30 °C)		
– Alla potenzialità utile	°C	45
– a carico ridotto	°C	30
Temperatura (con una temperatura del ritorno di 60 °C)	°C	70
Portata (con gas metano)		
– Alla potenzialità utile	kg/h	900
– a carico ridotto	kg/h	300
Pressione disponibile sull'attacco scarico fumi	Pa mbar	70 0,7
Allacciamento scarico fumi	Ø mm	250
Rendimento stagionale		
con temperatura dell'impianto di riscaldamento di 40/30 °C	%	
con temperatura dell'impianto di riscaldamento di 75/60 °C	%	
Dispersione in stand-by $q_{b,7e}$	%	0,23
Livello di rumorosità¹³ a pieno carico		
1 m di fronte alla caldaia RLA	dB(A)	79,8
1 m di fronte alla caldaia RLU	dB(A)	71,8
Nel tubo fumi	dB(A)	96,3

Figura 30 – Caratteristiche tecniche della caldaia

La scelta di questo modello è stata possibile grazie a varie prove svolte sul programma DesignBuilder che hanno fornito i valori necessari a coprire il carico termico dell'impianto.

Questa caldaia è collegata a un circuito ad acqua calda che alimenta le batterie di riscaldamento delle unità di trattamento aria (UTA) e delle unità di circolazione forzata.

Produzione di acqua refrigerata

Il raffrescamento estivo è garantito dal chiller “EWWQ380B-SS”¹⁰⁴ della Daikin (Figura 31), che alimenta il circuito di acqua refrigerata. Tale circuito serve le batterie di raffreddamento presenti nell'UTA e nelle unità di circolazione forzata.

SPECIFICHE TECNICHE			EWQ B-SS	380	
Capacità (1)	Freddo		kW	380	
Controllo capacità	Tipo			Continuo	
	Carico minimo		%	25	
Potenza assorbita unità (1)	Freddo		kW	86	
EER (1)				4,44	
ESEER				5,16	
Telaio e cabinato	Colore			Ivory White (Munsell code 5Y7.5/1)	
	Materiale			Lamiera zincata e verniciata	
Dimensioni	Unità	Altezza	mm	1849	
		Larghezza	mm	1140	
		Lunghezza	mm	3373	
Peso	Unità		kg	1933	
	Peso in funzionamento		kg	2135	
Scambiatore ad acqua Evaporatore	Tipo			A fascio tubiero	
	Volume acqua			l	124
	Portata nominale acqua	Freddo	l/min	18,2	
	Perdita carico nominale acqua	Freddo	kPa	47	
	Materiale isolamento			Elastomero a celle chiuse	
Scambiatore ad acqua Condensatore	Tipo			A fascio tubiero	
	Numero di condensatori		No.	1	
	Volume acqua			l	79
	Portata nominale acqua	Freddo	l/min	22,9	
	Perdita carico nominale acqua	Freddo	kPa	58	
Materiale isolamento			Elastomero a celle chiuse		
Compressori	Tipo			Semiermetici singola vite	
	Carica olio	l		16	
	Quantità			1	
Livello sonoro	Potenza sonora (2)	Freddo	dBA	100,2	
	Pressione sonora (2)	Freddo	dBA	82,2	
Circuito refrigerante	Tipo refrigerante			R410A	
	N. circuiti			1	
Connessioni acqua	Ingresso / uscita acqua evaporatore		mm	168,3	
Connessioni acqua	Ingresso / uscita acqua condensatore		in	5"	
Dispositivi sicurezza	Alta pressione (pressostato)				
Dispositivi sicurezza	Bassa pressione (pressostato)				
Dispositivi sicurezza	Stop emergenza				
Dispositivi sicurezza	Alta temperature mandata compressore				
Dispositivi sicurezza	Monitore di fase				
Dispositivi sicurezza	Basso Δp				
Dispositivi sicurezza	Alto Δp olio				
Dispositivi sicurezza	Basso Δp olio				
Nota (1)	Capacità frigorifera, potenza assorbita unità a freddo ed EER sono relativi alle seguenti condizioni: evaporatore 12/7°C; condensatore 30/35°C.				
Nota (2)	I valori sono in accordo alla ISO 3744 e sono riferiti all'evaporatore 12/7°C, condensatore 30/35°C, funzionamento a pieno carico.				

Figura 31 – Caratteristiche tecniche del chiller

Circuito di condensazione

Il gruppo frigorifero è associato a un circuito di condensazione, che consente lo smaltimento del calore verso l'esterno, assicurando il corretto funzionamento del ciclo frigorifero.

Tutti questi dati vengono riportati nelle schede di ogni componente dell'impianto.

Sistema di trattamento e distribuzione dell'aria (Figura 32)

Il sistema aria è costituito da una Unità di Trattamento Aria (UTA) centralizzata che svolge le seguenti funzioni:

- presa di aria esterna;
- filtrazione dell'aria;
- riscaldamento tramite batteria ad acqua calda;
- raffreddamento e deumidificazione tramite batteria ad acqua refrigerata;

- ventilazione mediante ventilatori di mandata e ripresa.

L'aria trattata viene distribuita alle varie zone dell'edificio attraverso una rete di canali, mentre l'aria di ritorno viene in parte espulsa e in parte ricircolata, secondo le logiche di controllo impostate.

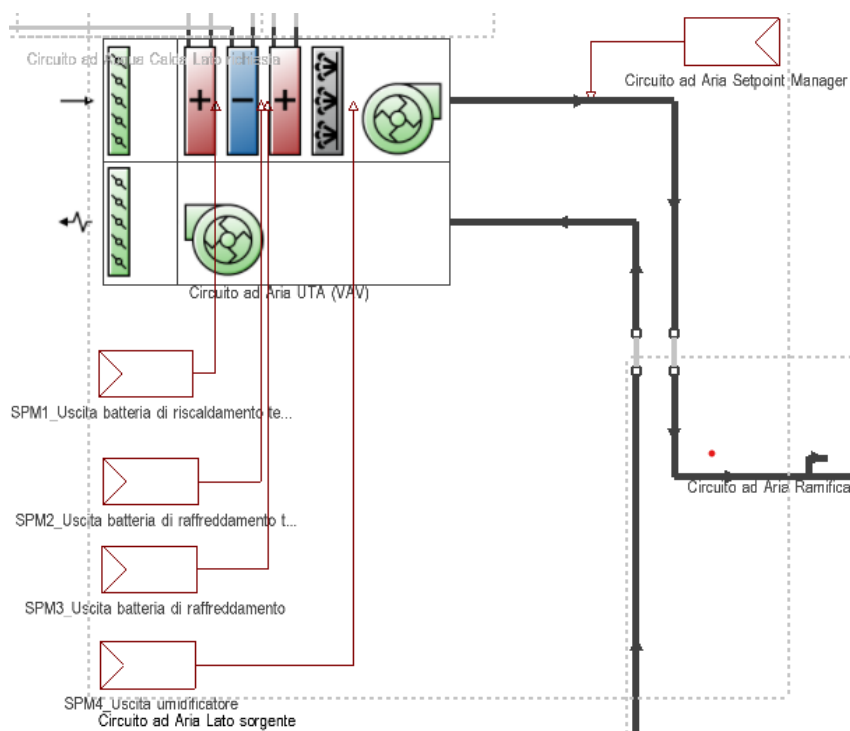


Figura 32 – Schema UTA

Durante il periodo invernale l'aria viene soltanto riscaldata tramite la prima batteria ad acqua calda mentre nel periodo estivo entrano in funzione tutte le batterie compreso l'umidificatore.

Ogni punto di questo impianto è gestito e controllato tramite dei set-point accuratamente programmati per gestirne il funzionamento e le caratteristiche dell'aria come la temperatura e l'umidità dell'aria in uscita.

Zone servite

Il gruppo di zone comprende ogni zona del supermercato e ognuna è dotata di un controllo indipendente della temperatura interna e della ventilazione, consentendo una regolazione differenziata in funzione dell'uso e dei carichi termici specifici. Per questo motivo per ogni zona è stato studiato un programma personalizzato.

Logiche di controllo

Il sistema è regolato tramite:

- set-point di temperatura distinti per riscaldamento e raffrescamento;
- controllo della portata d'aria in funzione delle esigenze di ventilazione;
- funzionamento stagionale differenziato (modalità invernale/estiva).

Questo approccio consente di garantire condizioni di comfort termo-igrometrico adeguate agli occupanti, ottimizzando al contempo i consumi energetici.

Consumi d'acqua

Nel contesto del supermercato oggetto di studio, l'analisi dei consumi idrici rappresenta un passaggio preliminare fondamentale, in quanto consente di valutare la potenziale applicabilità e convenienza dell'adozione di una macchina AWG.

Nel presente capitolo analizzeremo prima i consumi derivanti dall'uso dell'acqua calda sanitaria e successivamente quelli derivanti dall'uso di acqua fredda. Ricordiamo che entrambi possono essere sostenuti da un sistema AWG.

ACS

Per il consumo di acqua calda sanitaria a 40 °C viene utilizzato il valore di riferimento 0,2 l/m² giorno derivante dalla normativa UNI/TS 11300-2:2019.⁹³

- Fabbisogno per i dipendenti (servizi igienici e docce), con un picco di 45 dipendenti, e assumendo che le docce siano le principali consumatrici di ACS:
 - Spogliatoi (docce): la dotazione prevede 1 doccia nello spogliatoio femminile e 1 doccia in quello maschile. Assumendo 3 utilizzi per doccia al giorno e 40 l i consumi sono circa 1200 l/giorno
 - Lavabi/servizi igienici dipendenti: assumendo 5 l/persona giorno per i 45 dipendenti (per lavaggio mani, ecc.) avremo un valore di 225 l/giorno
- Fabbisogno per i reparti (lavorazione/pulizia), stimando in base alla dimensione del supermercato e alla presenza di banchi freschi.
 - Aree lavorazione (gastronomia, macelleria, pescheria): per un supermercato di 2.400 m² con banchi freschi completi, il consumo d'acqua per la sola pulizia e processo può essere stimato pari a 500 litri/giorno di acqua calda.
- Fabbisogno per i clienti
 - Bagni clienti: con un picco massimo teorico di 200 persone (anche se l'affluenza reale è inferiore) e assumendo un consumo di 2 l/persona giorno per l'igiene: 400 l/giorno

Per un totale di 2.325 l/giorno di ACS a 40 °C, cioè 0,97 l/m²giorno, cioè 96,88 l/h. Ogni valore andrà inserito nella zona del modello corrispondente.

Per una maggiore precisione è stato sviluppato un programma di utilizzo orario dell'acqua calda sanitaria (Tabella 12).

Fascia oraria	Utilizzo
00:00–06:00	0
06:00–08:00	0.5
08:00–10:00	0.4
10:00–12:00	0.8
12:00–14:00	1.0
14:00–17:00	0.4

17:00–20:00	0.5
20:00–22:00	1
22:00–24:00	0

Tabella 12 – Programma di utilizzo orario ACS

Acqua fredda

L'acqua fredda non viene spesso considerata ma come vedremo ha un consumo molto elevato.

- Acqua per servizi igienici (scarichi wc), assumiamo che il consumo sia pari a 6 l per scarico per volta.
 - Dipendenti (45 persone): 2 utilizzi a persona: 540 l/giorno
 - Clienti (picco di 200 persone): assumendo un'affluenza media equivalente a 120 persone/giorno che usano il bagno, 1 utilizzo a persona: 720 l/giorno
- Acqua per macchina del ghiaccio
 - Macchina del ghiaccio con produzione media di 40 kg/giorno. Se l'acqua di processo viene convertita in ghiaccio (e non dispersa come raffreddamento), consumo pari a circa 40 l/giorno
- Acqua per lavaggi pavimenti e ambienti; questo è uno dei consumi più variabili. Si stima in base all'area da pulire e alla frequenza.
 - Area lorda (per lavaggio): 2400 m²
 - Consumo per lavaggio (idropulitrice): 0,5 l/m² per lavaggio.
 - Frequenza: 1 lavaggio profondo al giorno.
 - Per un totale di 1200 l/giorno
- Altri consumi (ortaggi/processi secondari)
 - Ortaggi/nebulizzazione: stima di 50 l/giorno.
- Irrigazione parcheggio nella stagione secca; il parcheggio sarà il più verde possibile e deve essere circondato da una siepe. Tutto ciò andrà irrigato con un consumo di acqua notevole; pari a:
 - Fabbisogno della siepe nella stagione secca pari a 8 l/m giorno
 - Fabbisogno del prato nella stagione secca pari a 2 l/m² giorno
 - La siepe avrà larghezza pari a 1,5 m e lunghezza pari a 230 m e quindi un fabbisogno idrico complessivo pari a 1.840 l/giorno
 - L'erba del parcheggio avrà una superficie pari a 1.145 m², considerando l'erba in ogni posto auto con l'ingombro del pavimento drenante (circa 50 %) e quindi un fabbisogno idrico complessivo pari a 2.290 l/giorno

Solo all'interno dell'edificio avremo un consumo di acqua fredda pari a 2.550 l/giorno (106,3 l/h) mentre contando anche l'irrigazione, come nel periodo estivo, otterremo un risultato di circa 6.680 l/giorno.

9.4. ANALISI DEI RISULTATI: IL CASO DI MILANO

Sulla base dei criteri progettuali definiti nel capitolo precedente, la presente analisi si focalizza sui risultati ottenuti per il punto vendita di Milano, approfondendo le diverse componenti prestazionali del progetto.

Il punto vendita in oggetto, configurandosi come locale commerciale aperto al pubblico, è tenuto al rispetto delle disposizioni vigenti in materia di contenimento dei consumi energetici e gestione degli impianti termici, come previsto dal D.P.R. 74/2013¹⁰⁵ e dalle specifiche delibere e normative regionali in tema di temperature massime e minime consentite per il riscaldamento e il raffrescamento.

In regione Lombardia, il periodo di riscaldamento va dal 15 ottobre al 15 aprile¹⁰⁶, durante il quale è necessario mantenere una temperatura interna il più possibile prossima ai 18 °C. Per il raffreddamento, invece, la temperatura viene mantenuta intorno ai 26 °C, al fine di evitare eccessivi sbalzi termici per i consumatori.

Di seguito si riportano gli andamenti dei principali parametri utilizzati in questo contesto per l'analisi delle prestazioni degli impianti

Boiler Heating Rate

Il Boiler Heating Rate rappresenta l'energia termica utile erogata dalla caldaia verso l'impianto di distribuzione (Tabella 13).

Esprime il calore effettivamente trasferito all'acqua dell'impianto per il riscaldamento degli ambienti o per la produzione di acqua calda sanitaria.

Dai calcoli risulta l'andamento in figura in funzione delle condizioni climatiche esterne, che si può riassumere nei valori totali annuali

ENERGIA TERMICA UTILE				
Milano	62805,172	kWh	27,103	kWh/m ²

Tabella 13 – Energia termica utile senza AWG annua a Milano

Con un andamento giornaliero rappresentato nel Grafico 21.

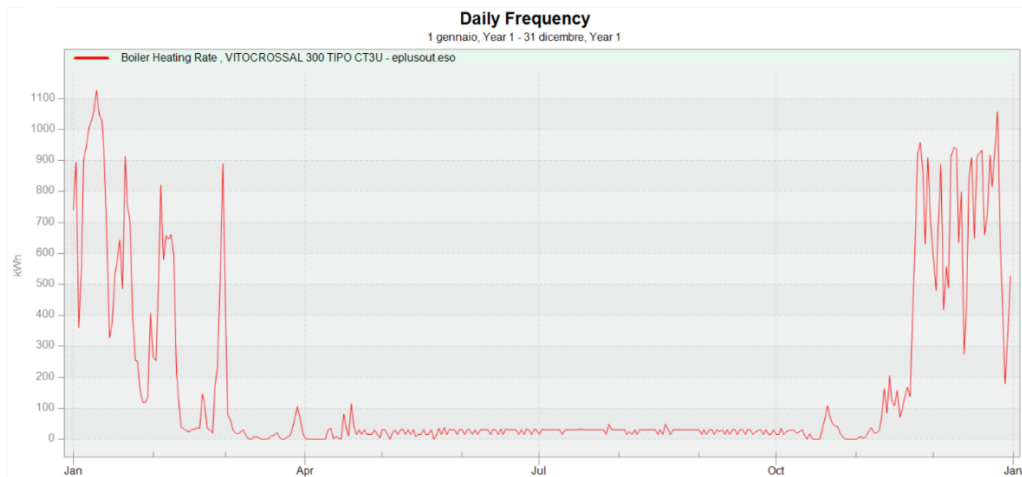


Grafico 21 – Energia termica utile senza AWG giornaliera a Milano

Come si può notare la caldaia presenta anche un consumo estivo causato dal normale utilizzo di ACS e dalla presenza della batteria di post riscaldamento estivo nella UTA descritta in precedenza.

Boiler NaturalGas Rate

Il Boiler NaturalGas Rate rappresenta l'energia associata al flusso di energia chimica del gas naturale in ingresso alla caldaia (Tabella 14).

Esprime l'energia del combustibile consumato, comprensiva delle perdite. Non coincide quindi con l'energia termica utile fornita all'impianto.

Relazione con l'energia utile:

$$Q_{utile} = Q_{gas} \cdot \eta_{boiler}$$

Dove:

- Q_{gas} = Boiler NaturalGas Rate
- Q_{utile} = Boiler Heating Rate

Dalla simulazione emerge un valore di Boiler NaturalGas Rate pari a:

ENERGIA DEL COMBUSTIBILE IN INGRESSO			
Milano	57890,852 kWh	24,982 kWh/m ²	

Tabella 14 – Energia del combustibile in ingresso senza AWG annua a Milano

Con un andamento giornaliero rappresentato nel Grafico 22.

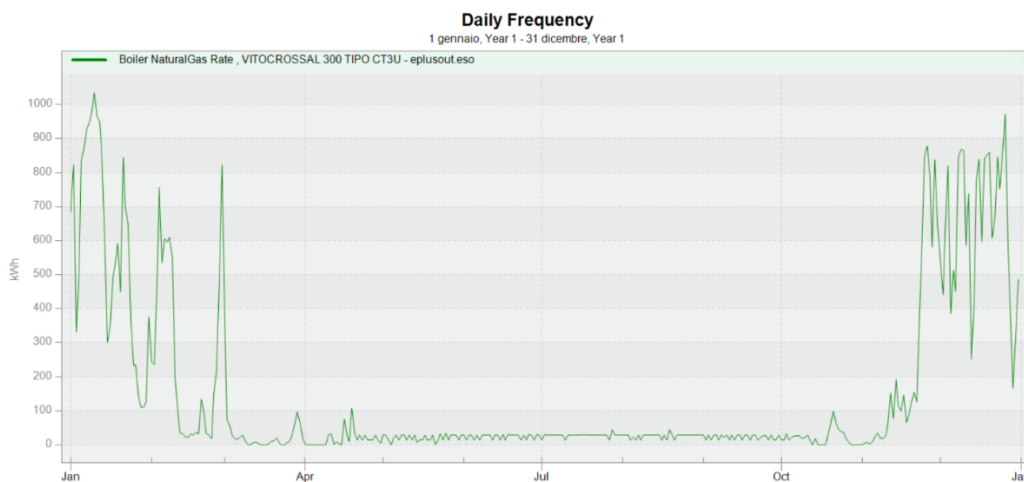


Grafico 22 – Energia del combustibile in ingresso senza AWG giornaliera a Milano

I due grafici precedenti rappresentano rispettivamente l'energia termica erogata (kWh) e l'energia del combustibile in ingresso alla caldaia.

Il picco massimo di riscaldamento si registra tra gennaio e febbraio, con valori che superano i 1100 kWh/giorno. Il consumo di gas segue fedelmente questo profilo. Da maggio a settembre, la caldaia è quasi completamente spenta, come previsto per il clima di Milano.

Nel modello sviluppato in DesignBuilder, la caldaia è rappresentata mediante un rendimento termico variabile, descritto attraverso una curva di prestazione normalizzata di tipo bi-quadratico. Tale approccio consente di riprodurre in modo più realistico il comportamento del generatore al variare delle condizioni operative.

Il rendimento effettivo della caldaia è calcolato come prodotto tra il rendimento nominale e il valore restituito dalla curva di efficienza. In alcune condizioni, la funzione di curva può assumere valori superiori all'unità, determinando un rendimento effettivo maggiore di 1.

Questo comportamento è coerente con il funzionamento delle caldaie a condensazione, che recuperano parte del calore latente dei fumi. Inoltre, il modello fa riferimento al potere calorifico inferiore (PCI) del gas naturale, che non include tale contributo energetico. Di conseguenza, il rapporto tra energia utile prodotta ed energia del combustibile può risultare superiore all'unità.

Per questo motivo, in alcuni intervalli si osserva che l'energia termica utile (Boiler Heating Rate) risulta maggiore dell'energia del combustibile in ingresso (Boiler NaturalGas Rate). Tale risultato non rappresenta un errore di simulazione, ma è una conseguenza della formulazione del rendimento e delle ipotesi energetiche adottate nel modello.

Calcolo del consumo orario di gas naturale

Dal Boiler NaturalGas Rate, che, come abbiamo visto, rappresenta l'energia associata al flusso di energia chimica del gas naturale in ingresso alla caldaia, si può ottenere il consumo reale di gas naturale attraverso il potere calorifico inferiore (PCI) del combustibile (Tabella 15).

Assumendo per il gas naturale un valore medio di PCI pari a ¹⁰⁷:

$$PCI_{gas} \approx 9,91 \text{ kWh/m}^3$$

il consumo volumetrico orario di gas naturale può essere calcolato come:

$$V_{gas} [\text{m}^3/\text{h}] = \frac{\text{Boiler Natural Gas Rate [kWh]}}{PCI_{gas} [\text{kWh/m}^3]}$$

Dal valore precedentemente citato a seguito dei calcoli si ottiene:

CONSUMI TOTALI				
Area supermercato	2317,260	m ²		
Energia del combustibile in ingresso	57890,852	kWh	24,982	kWh/m ²
Consumo di gas naturale	5841,660	Sm ³	2,521	Sm ³ /m ²

Tabella 15 – Consumo annuo di gas naturale senza AWG a Milano

Chiller EER

Il Energy Efficiency Ratio (EER) è il rapporto tra l'energia frigorifera utile prodotta e l'energia elettrica assorbita dal gruppo frigorifero.

$$EER = \frac{Q_{freddo}}{P_{elettrica}}$$

Maggiore è l'EER, maggiore è l'efficienza del sistema di raffreddamento.

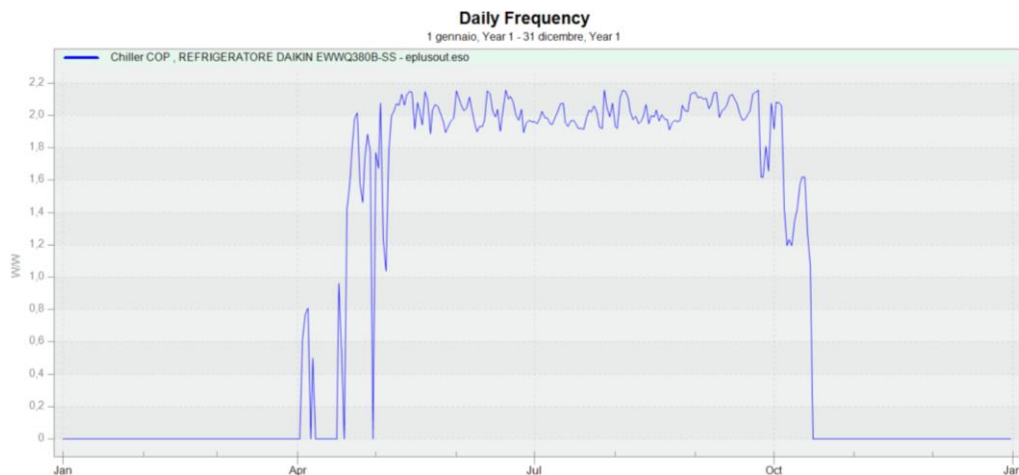


Grafico 23 – EER giornaliero del refrigeratore senza AWG a Milano

Il Grafico 23 illustra il coefficiente di prestazione del refrigeratore Daikin EWWQ380B-SS.

Si osserva che, mentre in ambito tecnico-normativo per i gruppi frigoriferi si predilige l'uso del termine EER (Energy Efficiency Ratio) per descrivere l'efficienza in fase di raffreddamento, il motore di calcolo EnergyPlus restituisce il valore come Chiller COP. In questo contesto, i due termini sono numericamente equivalenti poiché entrambi rappresentano il rapporto istantaneo tra l'energia frigorifera rimossa all'evaporatore e l'energia elettrica assorbita dal compressore e dagli ausiliari.

Il COP oscilla tra 1,8 e 2,2 durante la stagione estiva con un valore medio pari a 1,9. La continuità del grafico indica che il chiller è ben dimensionato per coprire il carico basale del supermercato senza continui cicli di accensione/spengimento.

Chiller Electricity Rate

Energia elettrica istantanea assorbita dal gruppo frigorifero (Tabella 16); rappresenta il consumo elettrico del compressore e dei sistemi ausiliari durante il funzionamento.

ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DAL CHILLER			
Milano	34119,822	kWh	14,724 kWh/m ²

Tabella 16 – Energia elettrica annua assorbita dal refrigeratore senza AWG a Milano

Con un andamento giornaliero rappresentato nel Grafico 24.

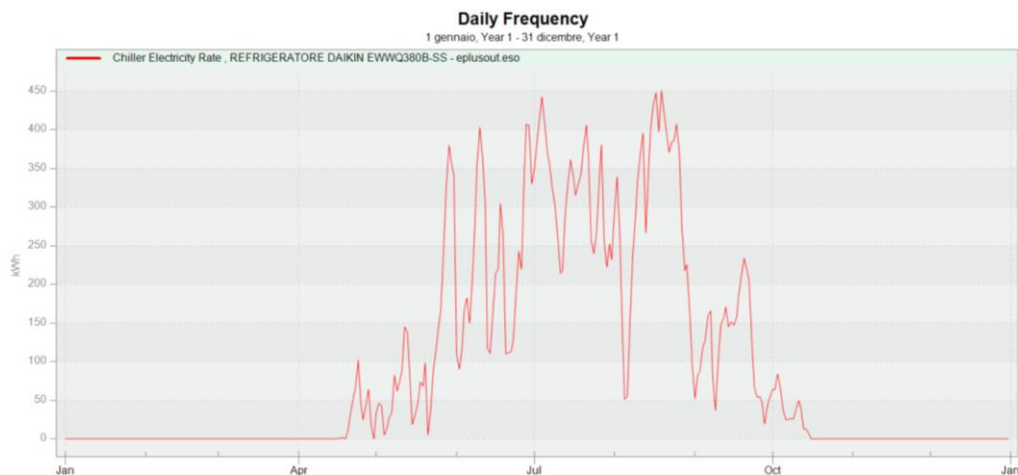


Grafico 24 – Energia elettrica giornaliera assorbita dal refrigeratore senza AWG a Milano

Chiller Evaporator Cooling Rate

Energia frigorifera utile fornita all'impianto (Tabella 17); rappresenta il raffrescamento effettivamente disponibile per la climatizzazione degli ambienti.

ENERGIA FRIGORIFERA FORNITA			
Milano	116285,720	kWh	50,1824 kWh/m ²

Tabella 17 – Energia frigorifera annua fornita dal refrigeratore senza AWG a Milano

Con un andamento giornaliero rappresentato nel Grafico 25.

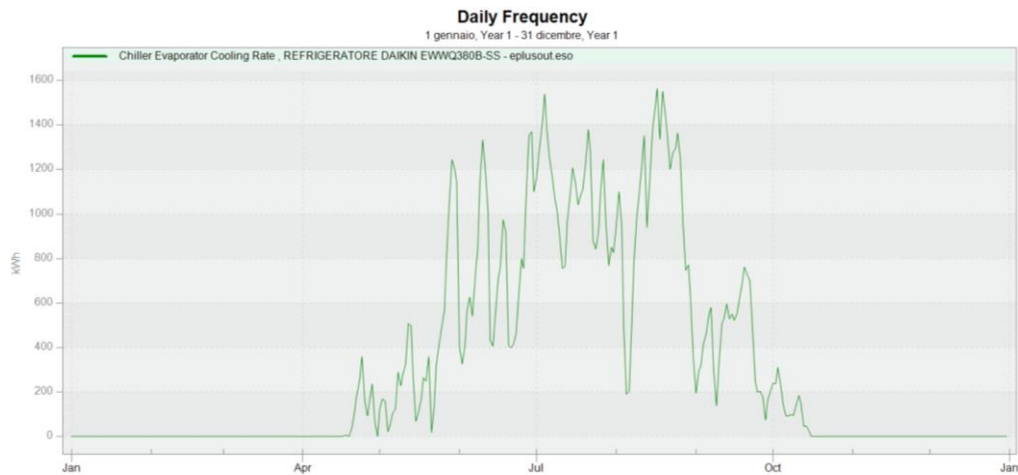


Grafico 25 – Energia frigorifera giornaliera fornita dal refrigeratore senza AWG a Milano

Analisi dell'energia elettrica assorbita rispetto all'energia frigorifera prodotta all'evaporatore.

Il picco di raffrescamento avviene a luglio/agosto con circa 1550 kWh/giorno di energia frigorifera richiesta, a fronte di un consumo elettrico di circa 450 kWh/giorno.

Il Grafico 24 (relativo all'energia elettrica assorbita) e il Grafico 25 (relativo all'energia frigorifera fornita) presentano un andamento temporale pressoché identico. Questa forte analogia visiva è perfettamente coerente con la fisica del sistema: l'energia elettrica richiesta dal compressore e dai sistemi ausiliari del gruppo frigorifero è direttamente proporzionale alla richiesta di carico di raffrescamento che l'impianto deve soddisfare istante per istante.

Tuttavia, i due grafici rappresentano due grandezze fisiche ben distinte evidenziate dalla notevole differenza di scala sull'asse delle ordinate.

Questa differenza di ampiezza evidenzia l'efficienza della macchina. Il chiller, infatti, riesce a "trasferire" una quantità di energia termica per il raffrescamento decisamente superiore rispetto all'energia elettrica che consuma per farlo funzionare.

Energy Use Intensity (EUI)

L'Energy Use Intensity (EUI), espressa in kWh/m²·anno, rappresenta un indicatore sintetico particolarmente efficace per il confronto tra edifici e scenari climatici diversi.

Il software restituisce due valori differenti (Tabella 18):

- Site Energy (Energia al sito) è l'energia che si legge sul contatore;
- Source Energy (Energia primaria) è l'energia totale consumata alla fonte (centrale elettrica) per avere quei kWh. Include le perdite di trasporto e produzione.

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m ²]
Total Site Energy	453027.09	195.50
Total Source Energy	1314150.16	567.11

Tabella 18 – Valori annui del EUI senza AWG a Milano

Il confronto con gli standard di riferimento per edifici commerciali, come quelli presenti nel database URBEM, consente di contestualizzare i risultati ottenuti. Secondo i dati riportati in URBEM¹⁰⁸ ed elaborazioni analoghe disponibili in letteratura tecnica nazionale (ENEA, studi su edifici della GDO), i supermercati di medie dimensioni in Italia presentano valori di EUI complessivo generalmente compresi tra 400 e 600 kWh/m²·anno, con valori inferiori tipici di edifici di nuova costruzione o recentemente riqualificati e valori superiori associati a edifici energivori o collocati in climi caldi.¹⁰⁹

Nel caso studio analizzato, i valori di EUI risultano pari a circa 567 kWh/m²·anno per Milano se si considera il contributo complessivo della Total Source Energy, mentre l'EUI elettrico ha un valore di 195,5 kWh/m². Quest'ultimo valore è direttamente confrontabile con gli standard URBEM per la sola componente elettrica, risultando coerente con i consumi tipici dei supermercati caratterizzati da elevata incidenza di refrigerazione, illuminazione e HVAC.

Per validare la robustezza del modello simulato e contestualizzare le prestazioni energetiche del supermercato nel territorio lombardo, i risultati ottenuti per la città di Milano sono stati messi a confronto con i dati medi regionali del database CENED¹¹⁰ (Certificazione Energetica degli Edifici in Lombardia).

Prima di procedere al confronto, è fondamentale precisare che il calcolo dell'Energia Primaria non rappresenta un valore assoluto di consumo, ma dipende dai fattori di conversione in energia primaria non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$).

Per rendere l'analisi coerente con gli standard regionali, si è tenuto conto dei pesi assegnati ai diversi vettori energetici:

- Energia Elettrica da rete: 1,95
- Gas Naturale: 1,05

L'adozione di questi coefficienti permette di trasformare l'Energia al Sito (il dato prelevato dai contatori) in Energia Primaria (l'energia totale consumata alla fonte). Nel contesto milanese, l'indice di energia primaria risulta particolarmente sensibile al consumo elettrico.

Il confronto è stato effettuato prendendo come riferimento la destinazione d'uso E.5 (Edifici adibiti ad attività commerciali). Mentre la letteratura tecnica e il database URBEM indicano per la GDO un range tra 400 e 600 kWh/m² anno, i dati medi CENED per il terziario commerciale esistente in Lombardia tendono a essere leggermente più bassi, attestandosi mediamente intorno ai 350 e 480 kWh/m² anno; tuttavia, tale valore medio include una varietà di strutture (piccoli negozi, uffici aperti al pubblico) con carichi frigoriferi decisamente inferiori rispetto a un supermercato.

Nella tabella seguente (Tabella 19) si riporta lo scostamento tra il caso studio e il benchmark di riferimento:

Indicatore	Modello (Milano)	CENED	Scostamento
Energia Primaria	567,11 kWh/m ² anno	~420,00 kWh/m ² anno	+34%
Consumo Elettrico	170,52 kWh/m ² anno	~140,00 kWh/m ² anno	+21%

Tabella 19 – Scostamento consumi modello Milano e CENED

Il valore di 567,11 kWh/m²anno ottenuto dalla simulazione posiziona l'edificio nella fascia alta dei consumi regionali. Tale discrepanza non indica un'inefficienza del modello, bensì riflette la specificità energetica della Grande Distribuzione Organizzata (GDO) rispetto alla categoria commerciale generica:

- Incidenza della refrigerazione: a differenza di un comune negozio o ufficio (rientranti in E.5), il supermercato presenta un carico costante dovuto ai banchi frigo e alle celle frigorifere, che operano 24/7.
- Sistemi HVAC e ventilazione: l'elevato affollamento e la necessità di contrastare le dispersioni dei mobili frigoriferi richiedono una gestione dell'aria estremamente energivora, specialmente nel clima di Milano.
- Coerenza con i target GDO: Sebbene superiore alla media CENED, il dato risulta perfettamente in linea con i report di sostenibilità dei principali player del settore retail, confermando che il modello simulato rappresenta in modo realistico un edificio ad alta intensità energetica.

Questi margini evidenziano l'importanza delle strategie di efficientamento e dell'integrazione di sistemi rinnovabili che verranno analizzate nei capitoli successivi per ridurre l'impronta carbonica del sito.

Produzione di CO₂

La produzione di CO₂ è stata calcolata utilizzando i fattori medi italiani ISPRA, pari a 0,28 kgCO₂/kWh per l'energia elettrica e 1,97 kgCO₂/Sm³ per il gas naturale.¹¹¹

I risultati del calcolo sono pari a: (Tabella 20).

PRODUZIONE CO ₂			
Fattori medi italiani ISPRA	Elettricità	0,28	kgCO ₂ /kWh
	Gas	1,97	kgCO ₂ /Sm ³
CO ₂ prodotta per l'elettricità		110638,15	kgCO ₂
CO ₂ prodotta per gas naturale		11508,07	kgCO ₂

Tabella 20 – Produzione di CO₂ annua senza AWG a Milano

Comfort termico

Il comfort termico è stato valutato attraverso indicatori di disagio, quali le ore di setpoint non rispettato durante i periodi di occupazione e le ore non confortevoli secondo il modello semplificato ASHRAE 55.¹¹²

Lo standard ASHRAE 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, definisce le condizioni ambientali accettabili per garantire il comfort termico della maggior parte degli occupanti. Il comfort termico è valutato principalmente attraverso due indici: PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), sviluppati da Fanger.

Il modello PMV stima il voto medio di una grande popolazione di soggetti su una scala a 7 punti, che va da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo), passando per 0 (neutro). Il valore di PMV dipende dall'equilibrio energetico del corpo umano ed è funzione delle seguenti variabili:

- Temperatura dell'aria (T_a)
- Temperatura media radiante (T_r)
- Velocità dell'aria (v_a)
- Umidità relativa (o pressione parziale del vapore acqueo)
- Metabolismo (M), legato all'attività svolta
- Isolamento termico dell'abbigliamento (I_{cl})

Il calcolo del PMV si basa sull'equazione del bilancio termico del corpo umano, che mette in relazione la produzione metabolica di calore con le perdite di calore per convezione, irraggiamento, evaporazione e respirazione. In forma semplificata:

$$PMV = f(M, I_{cl}, T_a, T_r, v_a, RH)$$

A partire dal PMV è possibile determinare il PPD, che rappresenta la percentuale prevista di occupanti insoddisfatti delle condizioni termiche:

$$PPD = 100 - 95 * e^{-0,03353*PMV^4 - 0,2179*PMV^2}$$

Secondo ASHRAE 55, un ambiente è considerato termicamente accettabile quando il valore di PMV è compreso approssimativamente tra -0,5 e +0,5, corrispondente a un PPD $\leq 10\%$, ovvero almeno il 90% degli occupanti si trova in condizioni di comfort termico.

La simulazione restituisce tre diversi valori:

- Occupied Heating Not Met è il tempo totale in cui l'impianto di riscaldamento non ha raggiunto la temperatura desiderata mentre c'erano persone nell'edificio.
- Occupied Cooling Not Met è il tempo in cui l'impianto di raffrescamento non è riuscito a mantenere la temperatura impostata.

- Time Not Comfortable ASHRAE 55 questo dato non riguarda solo la temperatura del termostato, ma il benessere globale (umidità, velocità dell'aria, irraggiamento delle pareti).

Dalla simulazione emergono i valori presenti nella Tabella 21

Comfort and Setpoint Not Met Summary

	Facility [Hours]
Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	0.00
Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	5.50
Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3751.00

Tabella 21 – Ore di disagio termico annue senza AWG a Milano

Il valore ASHRAE 55-2004 risulta così elevato a causa dell'abbassamento della temperatura durante la notte in inverno e dello spegnimento del sistema di raffreddamento estivo durante la notte.

L'analisi evidenzia che a Milano il disagio è principalmente concentrato nella stagione estiva (Figura 33) (Grafico 26).

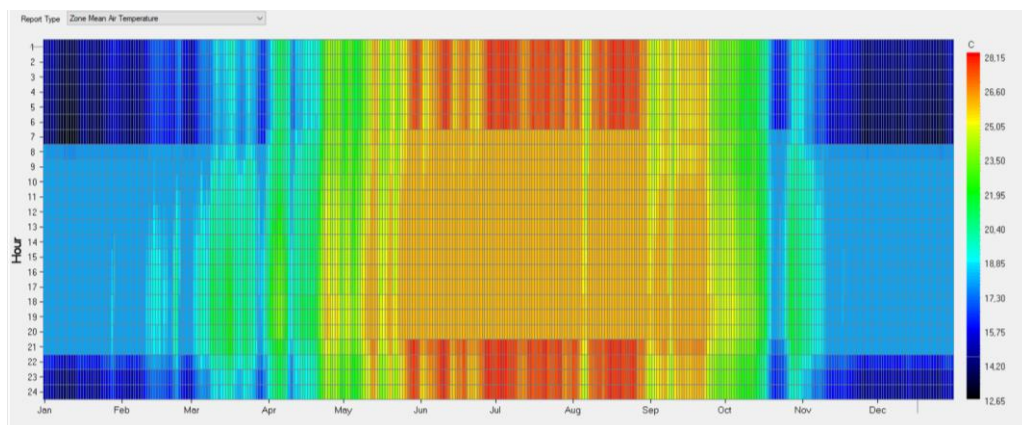


Figura 33 – Temperatura all'interno del supermercato senza AWG a Milano

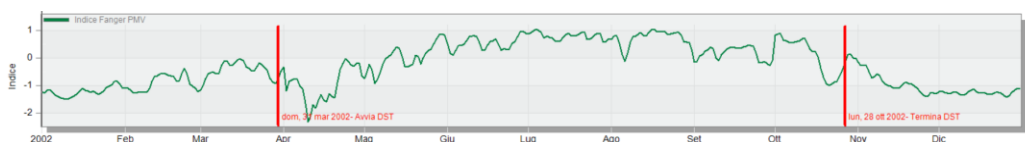


Grafico 26 – Grafico PMV senza AWG a Milano

Dal primo grafico emerge che le temperature di legge vengono rispettate durante l'orario di apertura per tutto l'anno e dal secondo grafico che il PMV è in linea con i casi reali analizzati, il picco minimo è in concomitanza con il cambio di stagione estivo in cui ci sono molte variazioni di temperatura esterne.

Analisi economica

Per la valutazione economica dei consumi del supermercato oggetto di studio, sono stati ricavati i costi unitari dell'energia elettrica e del gas naturale partendo da fatture reali di una grande utenza allacciata in Media Tensione (MT), ritenuta compatibile per taglia e profilo di prelievo con la tipologia edilizia analizzata.

Nello specifico:

- Per l'energia elettrica è stato adottato un costo medio 'all-inclusive' di 0,270 €/kWh. Tale valore comprende la componente energia, le perdite di rete, il dispacciamento, gli oneri di sistema, le accise e l'IVA al 22% tipica delle utenze commerciali.
- Per il gas naturale: È stato calcolato un costo medio di 0,79 €/Sm³. Valore comprensivo di IVA al 22%.

L'utilizzo di un costo medio globale risulta metodologicamente preferibile rispetto all'uso del solo prezzo della materia prima di borsa (PUN o PSV), poiché include l'incidenza pesante delle quote fisse e delle potenze impegnate, offrendo una stima molto più aderente all'esborso economico reale del punto vendita.

Grazie a questi valori pre-crisi energetica, è stato possibile stimare il costo mensile di esercizio dell'impianto HVAC (Tabella 22) (Grafico 27).

COSTI mensili			
Mese	Gas	Elettricità	Totale
Gennaio	1.427,45 €	0,00 €	1.427,45 €
Febbraio	569,79 €	0,00 €	569,79 €
Marzo	77,90 €	0,00 €	77,90 €
Aprile	41,04 €	122,64 €	163,68 €
Maggio	51,37 €	923,03 €	974,40 €
Giugno	59,39 €	1.809,40 €	1.868,79 €
Luglio	69,68 €	2.689,27 €	2.758,95 €
Agosto	65,53 €	2.536,15 €	2.601,68 €
Settembre	55,47 €	975,50 €	1.030,97 €
Ottobre	54,23 €	156,36 €	210,59 €
Novembre	566,09 €	0,00 €	566,09 €
Dicembre	1.576,99 €	0,00 €	1.576,99 €
TOT	4.614,91 €	9.212,35 €	13.827,26 €

Tabella 22 – Costi mensili senza AWG a Milano



Grafico 27 – Costi mensili senza AWG a Milano

9.4.1. STATO DI FATTO

Dall'analisi delle condizioni medie di gestione energetica di un supermercato, sulla base delle simulazioni svolte, sono emersi aspetti che possono essere considerati in fase di progettazione per rendere ogni supermercato un modello di efficienza e sostenibilità, capace di bilanciare esigenze operative, comfort degli utenti e tutela delle risorse.

Un aspetto molto rilevante riguarda il contenimento dei consumi della refrigerazione. I banchi frigo, soprattutto quelli aperti, costituiscono la quota predominante dei consumi dell'intero edificio. Questo dato non è sorprendente se si considera che questi apparecchi operano in un contesto sfavorevole, devono mantenere temperature molto basse in un ambiente destinato all'utenza, con un forte ricambio d'aria e con continui scambi termici indotti dalla presenza di persone, aperture e variazioni della temperatura interna. La scelta di banchi refrigerati chiusi o ad alta efficienza appare quindi una misura imprescindibile, non solo per ridurre direttamente l'energia assorbita ma anche per diminuire il carico termico secondario che grava sul sistema di climatizzazione. Ogni kWh risparmiato dalla refrigerazione genera infatti un risparmio aggiuntivo sull'HVAC, poiché l'impianto deve compensare meno l'apporto energetico per la refrigerazione dei banchi frigo nell'ambiente.

Proprio il sistema HVAC rappresenta il secondo elemento su cui intervenire con una maggiore attenzione progettuale. La climatizzazione di un supermercato richiede un'attenzione particolare, perché, come abbiamo visto, questo tipo di edificio presenta carichi interni estremamente variabili e caratterizzati da un'alta componente latente generata dalle persone, dalle attività dei reparti di alimenti freschi e dai banchi refrigerati. È per questo motivo che la presenza di sistemi di ventilazione evoluti, dotati di recuperatore di calore ad alta efficienza, costituisce un requisito essenziale. Tuttavia, non basta avere macchinari efficienti, è indispensabile un controllo dinamico e progressivo del funzionamento, basato su logiche di regolazione che tengano conto della reale occupazione dell'edificio e non solo di programmi predefiniti. Nei momenti di minore affluenza, ad esempio, un ridimensionamento delle portate d'aria può apportare benefici significativi senza compromettere la qualità dell'ambiente interno. Al contrario, nelle fasce di massima presenza, un aumento mirato delle portate permette di mantenere livelli di comfort adeguati e di prevenire situazioni di sovraccarico sull'impianto.

Una terza area di intervento riguarda l'illuminazione. Anche se i corpi illuminanti LED garantiscono già buoni livelli di efficienza, l'adozione di un sistema di gestione intelligente della luce permette di ridurre ulteriormente i consumi. La modulazione dell'illuminamento in funzione della luce naturale, dell'orario e della densità di occupazione incide in modo significativo sul bilancio energetico complessivo. È importante sottolineare che la luce non rappresenta solo un fabbisogno elettrico, ma anche un carico termico interno: ogni watt di potenza luminosa si trasforma in calore e richiede ulteriore energia per essere smaltito dal sistema HVAC. Una progettazione illuminotecnica intelligente, quindi, non ha effetti soltanto sulla bolletta elettrica, ma contribuisce indirettamente ad alleggerire il funzionamento degli impianti di climatizzazione.

9.5. INFLUENZA DEL CONTESTO CLIMATICO

Il presente capitolo ha l'obiettivo di confrontare i principali risultati ottenuti dalla simulazione energetica del supermercato, modellato in maniera identica e collocato in tre diverse località italiane rappresentative di differenti condizioni climatiche: Milano, Roma e Bari. Le tre città sono state scelte in quanto appartenenti a zone climatiche significativamente diverse, rispettivamente caratterizzate da clima continentale, temperato e mediterraneo.

Il confronto consente di valutare l'influenza del clima sulle prestazioni energetiche, ambientali e di comfort dell'edificio, mantenendo costanti le caratteristiche geometriche, impiantistiche e di utilizzo.

L'analisi si concentra sui principali output confrontabili:

- consumo energetico annuale;
- Energy Use Intensity (EUI);
- produzione di CO₂;
- comfort termico.

Valori recuperati dalle simulazioni svolte su DesignBuilder basate sul motore di calcolo EnergyPlus.

Consumi energetici annuali

L'analisi dei consumi energetici evidenzia differenze significative tra le tre località, principalmente imputabili alle diverse esigenze di riscaldamento e raffrescamento.

A Milano il consumo di gas naturale (Tabella 23) risulta il più elevato tra i tre scenari, a causa della maggiore severità della stagione invernale. Questo si traduce in un elevato fabbisogno di energia termica per il riscaldamento degli ambienti (Tabella 24), con un conseguente incremento dell'energia del combustibile consumato annualmente (Tabella 25). Al contrario, l'energia frigorifera fornita (Tabella 26) grazie al clima estivo più mite risulta la minore dei tre casi e di conseguenza il consumo elettrico associato al raffrescamento (Tabella 27) risulta relativamente contenuto rispetto alle altre due città.

Il caso di Roma rappresenta una situazione intermedia. I consumi di gas naturale sono inferiori rispetto a Milano, mentre aumentano i consumi elettrici per il raffrescamento estivo. Il bilanciamento tra riscaldamento e raffrescamento rende questo scenario particolarmente interessante come riferimento per edifici commerciali situati in climi temperati.

Infine, Bari mostra il consumo di gas naturale comparabile con quello di Roma, coerente con un clima caratterizzato da inverni miti. Mentre il fabbisogno di energia elettrica per il raffrescamento è quello maggiore tra i tre casi, a causa delle temperature estive più alte, della maggiore durata della stagione di raffrescamento ma grazie alla maggiore presenza di vento risulta simile al fabbisogno richiesto a Roma.

Nel complesso, il consumo elettrico totale annuale (Tabella 28) risulta massimo nel caso di Milano, seguito da Roma e Bari, evidenziando come la riduzione del

fabbisogno di raffrescamento non compensi completamente l'aumento dei carichi di riscaldamento (Tabella 29).

CONSUMO DI GAS NATURALE				
Milano	5841,660	Sm ³	2,521	Sm ³ /m ²
Roma	3509,635	Sm ³	1,515	Sm ³ /m ²
Bari	4197,330	Sm ³	1,811	Sm ³ /m ²

Tabella 23 – Consumo di gas naturale calcolato mediante l'uso del potere calorifico inferiore (PCI) del combustibile

ENERGIA TERMICA UTILE				
Milano	62805,172	kWh	27,103	kWh/m ²
Roma	37698,152	kWh	16,268	kWh/m ²
Bari	45094,386	kWh	19,460	kWh/m ²

Tabella 24 – Energia termica utile erogata dalla caldaia verso l'impianto di distribuzione

ENERGIA DEL COMBUSTIBILE IN INGRESSO				
Milano	57890,852	kWh	24,982	kWh/m ²
Roma	34780,487	kWh	15,009	kWh/m ²
Bari	41595,542	kWh	17,950	kWh/m ²

Tabella 25 – Energia associata al flusso di energia chimica del gas naturale in ingresso alla caldaia

ENERGIA FRIGORIFERA FORNITA				
Milano	116285,720	kWh	50,1824	kWh/m ²
Roma	149994,368	kWh	64,7292	kWh/m ²
Bari	150357,820	kWh	64,886	kWh/m ²

Tabella 26 – Energia frigorifera utile fornita all'impianto. Raffrescamento disponibile per la climatizzazione

ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DAL CHILLER				
Milano	34119,822	kWh	14,724	kWh/m ²
Roma	43786,799	kWh	18,896	kWh/m ²
Bari	44800,695	kWh	19,333	kWh/m ²

Tabella 27 – Energia elettrica assorbita dal gruppo frigorifero

CONSUMO ELETTRICO TOTALE				
Milano	395136,240	kWh	170,519	kWh/m ²
Roma	340384,070	kWh	146,891	kWh/m ²
Bari	332579,160	kWh	143,523	kWh/m ²

Tabella 28 – Consumo elettrico dell'intero supermercato

DIVISIONE DEI CARICHI			
Milano	Lighting	50,630	kWh/m ²
	HVAC	113,080	kWh/m ²
	Other	6,810	kWh/m ²
Roma	Lighting	50,630	kWh/m ²
	HVAC	89,450	kWh/m ²
	Other	6,810	kWh/m ²
Bari	Lighting	50,630	kWh/m ²
	HVAC	86,080	kWh/m ²
	Other	6,810	kWh/m ²

Tabella 29 – Divisione dei carichi elettrici all'interno del supermercato

Energy Use Intensity (EUI)

Tra i casi analizzati il valore di EUI (Tabella 30) (Tabella 31) più basso si registra a Bari, confermando l'efficienza energetica complessiva del supermercato in un clima temperato. Milano presenta un'EUI superiore, influenzata dal maggiore apporto energetico richiesto per il riscaldamento. Roma, invece, mostra il valore di EUI confrontabile con Bari ma più elevato principalmente a causa dell'intenso utilizzo degli impianti di climatizzazione estiva e della maggiore incidenza dei consumi elettrici.

Durante l'analisi dei risultati derivanti dal caso di Milano il confronto con gli standard di riferimento per edifici commerciali i supermercati di medie dimensioni in Italia presentano valori di EUI complessivo generalmente compresi tra 400 e 600 kWh/m²·anno.

Nei casi analizzati i valori di EUI risultano pari a circa 567 kWh/m²·anno per Milano, 481 kWh/m²·anno per Roma e 473 kWh/m²·anno per Bari se si considera il contributo complessivo della Total Source Energy, mentre l'EUI elettrico si colloca in un intervallo compreso tra 161 e 195 kWh/m²·anno.

Questi risultati sono confrontabili con i dati relativi ai report di sostenibilità presenti nel capitolo precedente (Tabella 3). Il confronto evidenzia pertanto che il modello simulato rappresenta in modo realistico un edificio della grande distribuzione organizzata, pur mostrando margini di miglioramento, in particolare negli scenari con EUI più elevato, dove il peso dei carichi di raffrescamento e della refrigerazione commerciale risulta dominante. Questi margini rendono particolarmente rilevante l'analisi di strategie di efficientamento e l'integrazione di sistemi rinnovabili, sviluppate nei capitoli successivi.

ENERGIA AL SITO CONSUMATA				
Milano	453027,090	kWh*anno	195,501	kWh/m ² * anno
Roma	375164,560	kWh*anno	161,900	kWh/m ² * anno
Bari	374174,710	kWh*anno	161,473	kWh/m ² * anno

Tabella 30 – Energia che si legge sul contatore

ENERGIA PRIMARIA				
Milano	1314150,160	kWh*anno	567,114	kWh/m ² * anno
Roma	1115698,410	kWh*anno	481,473	kWh/m ² * anno
Bari	1098367,780	kWh*anno	473,994	kWh/m ² * anno

Tabella 31 – Energia totale consumata alla fonte

Produzione di CO₂

Il caso di Milano presenta emissioni rilevanti legate al consumo di gas naturale, mentre Roma risulta penalizzata dalle elevate emissioni associate al consumo elettrico per il raffrescamento. Bari si colloca in una posizione intermedia, con un profilo emissivo più bilanciato.

Questi risultati (Tabella 32) mettono in evidenza come, anche in contesti con minore utilizzo di combustibili fossili, l'elevato consumo elettrico possa incidere in modo significativo sulle emissioni complessive, soprattutto in assenza di una produzione da fonti rinnovabili in sito.

PRODUZIONE DI CO ₂			
Milano	Per l'elettricità	110638,147	kgCO ₂
	Per gas naturale	11508,071	kgCO ₂
Roma	Per l'elettricità	95307,540	kgCO ₂
	Per gas naturale	6913,982	kgCO ₂
Bari	Per l'elettricità	93122,165	kgCO ₂
	Per gas naturale	8268,740	kgCO ₂

Tabella 32 – Produzione di CO₂ calcolata

Comfort termico

I risultati (Tabella 33) evidenziano che a Milano il disagio è principalmente concentrato nella stagione estiva, mentre a Bari si osserva un aumento significativo delle ore di disagio invernali. Roma mostra il miglior comportamento complessivo, con il minor numero di ore di disagio totale.

Questi risultati sono stati ottenuti mantenendo la stessa impedenza termica del vestiario (Icl) (Figura 34). L'impedenza termica del vestiario è misurata in CLO; 1 CLO = gradiente termico di 0,18 °C su un'area di 1 m² attraversata da un flusso termico di 1 Kcal/h. Maggiore è il valore dell'indice CLO, più è accentuata la sensazione di "caldo" e meno è sentita la sensazione di "freddo".¹¹³

Per il nostro modello si sono adottati i valori di 1 per l'inverno e 0,5 per l'estate in tutti e tre i casi.

Nudità	0 CLO
Calzoncini	0,1 CLO
Vestiti leggeri estivi	0,5 CLO
Insieme di capi leggeri	0,7 CLO
Completo invernale	1 – 1,5 CLO



Figura 34 - Impedenza termica del vestiario UNI EN ISO 9920/2004

Questi risultati confermano come il clima influisca non solo sui consumi energetici, ma anche sulla qualità ambientale interna, rendendo necessaria una progettazione impiantistica e gestionale mirata al contesto climatico specifico.

ORE DI DISAGIO		
Milano	Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	0,0 h
	Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	5,5 h
	Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3751,0 h
Roma	Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	0,0 h
	Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	8,8 h
	Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3498,3 h
Bari	Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	2,3 h
	Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	0,5 h
	Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3977,3 h

Tabella 33 – Ore di disagio per ogni stagione

9.6. INTERVENTI MIGLIORATIVI

Dall'analisi comparativa condotta emerge come le prestazioni energetiche e ambientali del supermercato siano fortemente influenzate dal contesto climatico di riferimento. Il confronto tra i casi studio di Milano, Roma e Bari evidenzia infatti differenze significative nel comportamento degli impianti e nei fabbisogni energetici e idrici, confermando la necessità di adottare un approccio progettuale sensibile alle specificità climatiche locali. In linea con gli standard di riferimento analizzati, risultano individuabili diverse possibilità di intervento finalizzate al miglioramento delle prestazioni complessive dell'edificio.

Nel presente lavoro l'attenzione è stata rivolta principalmente all'integrazione di impianti fotovoltaici e di sistemi AWG (Atmospheric Water Generator), con l'obiettivo di ridurre i consumi di energia primaria e le emissioni di CO₂, nonché di contenere il fabbisogno idrico. In particolare, l'accoppiamento tra fotovoltaico e AWG risulta più promettente negli scenari di Roma e Bari, dove l'elevata disponibilità di irraggiamento solare e le condizioni termo-igrometriche favorevoli rendono entrambe le tecnologie maggiormente efficaci rispetto al caso di Milano.

Nel quadro delle strategie di ottimizzazione, un ruolo centrale è svolto dall'impianto fotovoltaico. Il tetto piano del supermercato rappresenta una superficie particolarmente idonea all'installazione di moduli solari e la produzione diretta in autoconsumo costituisce una delle principali leve per contrastare i consumi elevati dovuti alla refrigerazione e ai sistemi HVAC, che operano prevalentemente nelle ore diurne. Il fotovoltaico si configura quindi non solo come una scelta sostenibile, ma come una soluzione tecnicamente coerente con il profilo di carico dell'edificio. La generazione locale di una quota dell'energia necessaria consente inoltre di migliorare il profilo emissivo complessivo, compensando in parte l'elevata impronta di carbonio associata ai consumi elettrici continui della refrigerazione.

Accanto al tema energetico, la gestione della risorsa idrica rappresenta un ulteriore ambito critico di intervento. Le analisi mostrano come il fabbisogno idrico del supermercato sia influenzato in misura rilevante dall'irrigazione delle aree esterne,

oltre che dagli usi interni tradizionali. Questo risultato evidenzia il ruolo strategico della progettazione del paesaggio nella sostenibilità complessiva dell'edificio. L'adozione di pavimentazioni drenanti, di essenze vegetali a bassa richiesta idrica e di sistemi di irrigazione automatizzati basati su sensori può consentire una riduzione significativa dei consumi, in particolare nei mesi estivi. Una possibile soluzione consiste nel limitare il manto erboso alle sole fasce divisorie dei parcheggi, con una superficie irrigata pari a 140 m² e un fabbisogno stimato di circa 280 L/giorno, portando il consumo totale di acqua fredda a circa 2.830 L/giorno. A tali misure può essere affiancato il recupero dell'acqua piovana, soluzione coerente in un contesto in cui i consumi esterni superano frequentemente quelli interni.

In questo quadro si inserisce l'installazione di un sistema AWG, che può contribuire alla riduzione del prelievo dalla rete idrica e al contenimento dello stress sulle infrastrutture di approvvigionamento, soprattutto in contesti caratterizzati da criticità idriche stagionali. Tuttavia, il sistema AWG non può essere considerato una soluzione autosufficiente nel contesto specifico del supermercato. L'elevato consumo elettrico necessario per la produzione di acqua dall'umidità dell'aria comporta infatti un aumento dei costi operativi e delle emissioni di CO₂. L'adozione di tale tecnologia risulta sostenibile solo a condizione di un corretto dimensionamento e di un'integrazione con fonti rinnovabili, in particolare con l'impianto fotovoltaico; in assenza di tali condizioni, l'AWG rischierebbe di non risultare vantaggioso né dal punto di vista ambientale, né in termini di costi per litro d'acqua prodotto lungo il ciclo di vita.

È opportuno infine sottolineare che ulteriori interventi di miglioramento potrebbero essere attuati sull'involucro edilizio, quali l'applicazione di un cappotto termico esterno e l'adozione di pellicole termoriflettenti sui vetri. Sebbene tali soluzioni non siano state approfondite nel presente elaborato, esse rappresentano strategie consolidate per la riduzione dei carichi termici e per il miglioramento del comfort interno, e costituiscono un ambito di un possibile sviluppo per futuri approfondimenti.

Nel complesso, la riqualificazione energetica e ambientale di un edificio destinato alla GDO può essere efficacemente affrontata attraverso un approccio integrato, in cui refrigerazione, climatizzazione, illuminazione, ventilazione e gestione dell'acqua vengano progettate in modo sinergico. I risultati mostrano come ogni intervento generi effetti trasversali sugli altri sistemi, rendendo necessario un approccio sistemico che tenga conto congiuntamente del clima locale, delle tecnologie impiantistiche e dell'integrazione delle fonti rinnovabili.

9.6.1. INTRODUZIONE DI UN SISTEMA AWG

Dall'analisi emerge che un impianto AWG in grado di coprire il completo fabbisogno di ACS porterebbe un aumento del consumo elettrico ed emissioni di CO₂ superiori rispetto alla rete idrica tradizionale. Questo significa che l'AWG deve essere dimensionata e studiata anche in base alle condizioni climatiche locali e che nel contesto sbagliato non è sostenibile né economicamente né ambientalmente senza un contributo massiccio di energia rinnovabile.

L'impianto AWG (Figura 36) è stato integrato nel modello energetico del supermercato (Figura 35) utilizzando i componenti e i circuiti di libreria di DesignBuilder. Il sistema non si limita alla sola produzione idrica, ma è parte integrante della strategia di trattamento dell'aria primaria per gli ambienti interni.

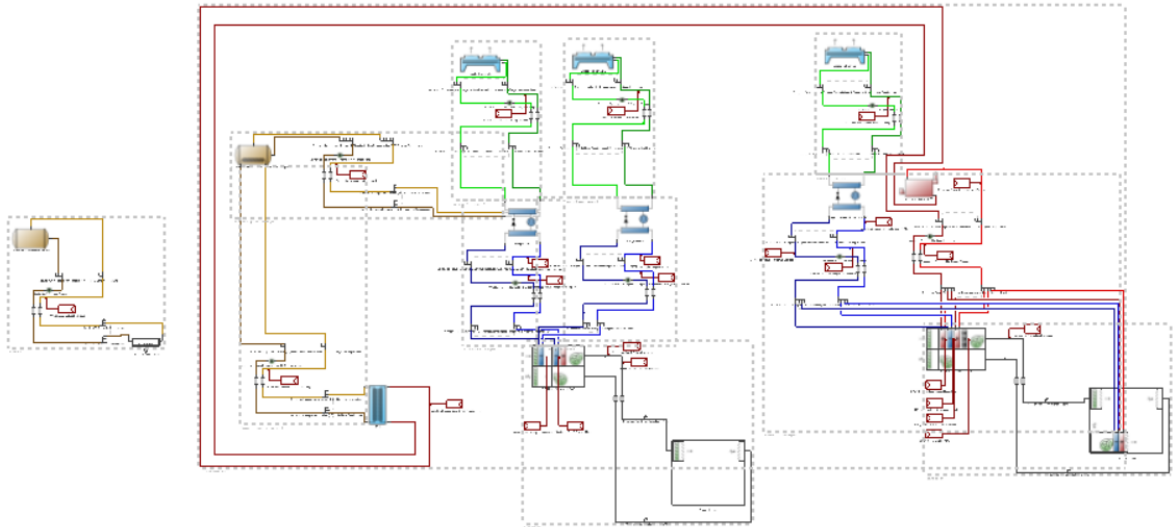


Figura 35 – Intero schema del sistema HVAC

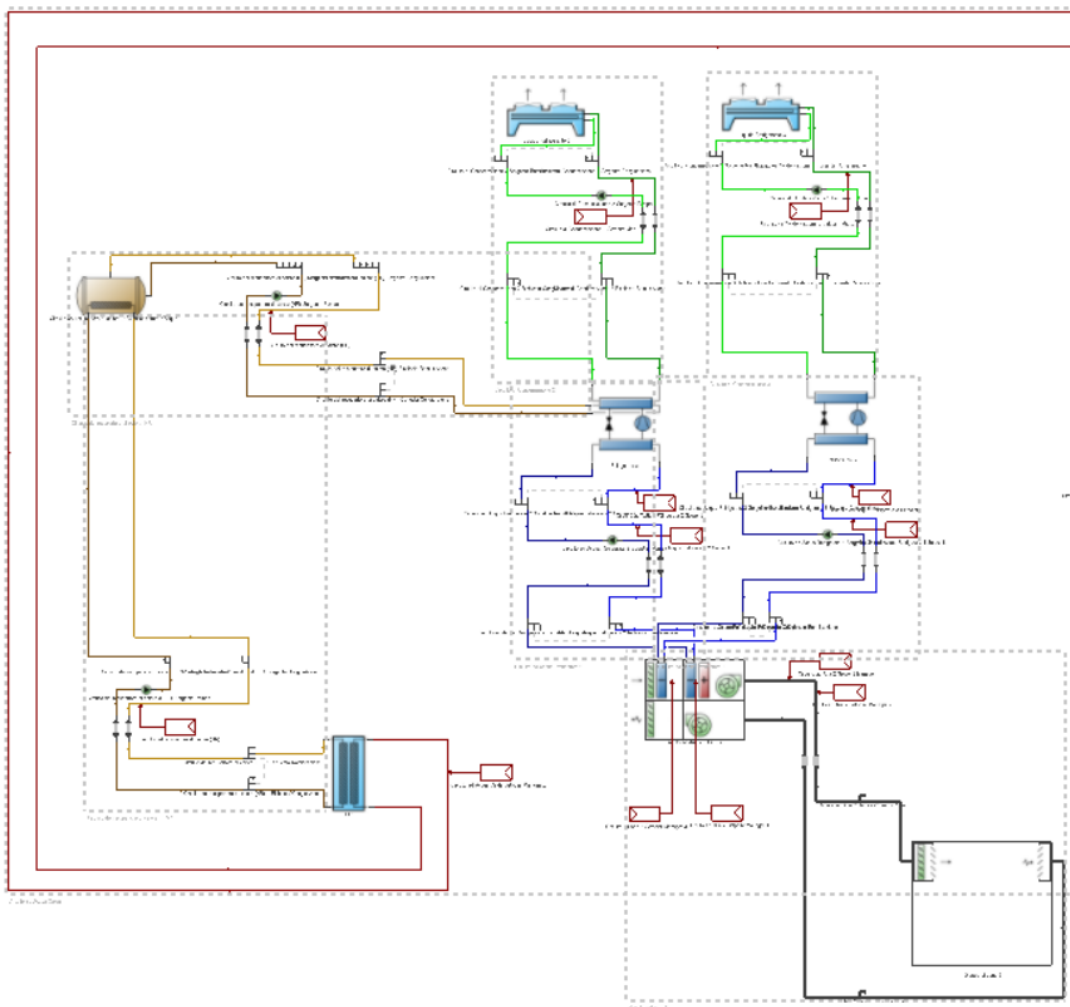


Figura 36 – Schema dell'impianto AWG

Per rendere più chiara la spiegazione dell'impianto è stato creato uno schema semplificato della macchina AWG creata (Figura 37).

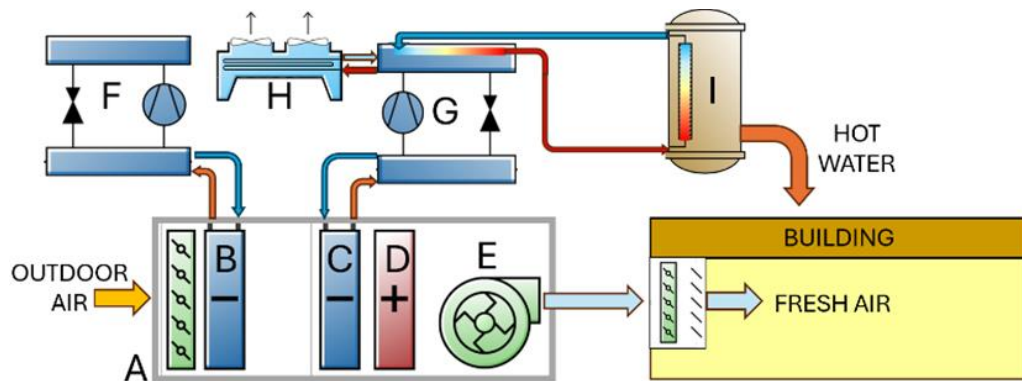


Figura 37 – Schema semplificato di una macchina AWG in DesignBuilder

Funzionamento

L'impianto è progettato per prelevare aria esterna, raffreddarla al di sotto del punto di rugiada per estrarre umidità sotto forma di acqua e, successivamente, immetterla nell'edificio come aria di rinnovo. Il sistema si compone di tre circuiti principali interconnessi:

- Circuito dell'aria (UTA): dove avviene il trattamento fisico dell'aria e la condensazione. Modellata come un'unità a portata variabile con un valore nominale di progetto di 3 m³/s. All'interno di questa unità, il trattamento termigrometrico avviene attraverso una sequenza di batterie di scambio termico.
- Circuito del freddo: alimentato da due chiller per fornire l'energia frigorifera necessaria alla deumidificazione.
- Circuito di recupero termico: per ottimizzare l'efficienza energetica e produrre acqua calda sanitaria (ACS).

Analisi di dettaglio dei componenti

Di seguito (Tabella 34) viene descritto il ruolo specifico di ogni componente, facendo riferimento alla schematizzazione di Figura 37 e ai parametri impostati nel software:

Componente	Ruolo	Specifiche tecniche
Air Treatment Unit A	Gestisce il transito della portata d'aria primaria verso l'edificio.	Modello: Portata variabile (VAV). Portata di design: 3 m ³ /s
Batteria B (preraffreddamento)	Parte del sistema che sottrae calore sensibile all'aria variandone le temperature.	Temperatura acqua ingresso: 5 °C Temperatura aria uscita: 9,2 °C Umidità specifica uscita: 6,23 g/kg
Batteria C (batteria di deumidificazione)	Punto critico del sistema dove avviene la	Temperatura acqua ingresso: 1 °C

	produzione idrica. Raffredda l'aria in ingresso variando l'umidità relativa, portandola sotto il punto di rugiada per forzare la condensazione.	Temperatura aria uscita: 2,44 °C Umidità specifica uscita: 4,45 g/kg
Batteria D (post riscaldamento)	Batteria elettrica che riporta l'aria a una temperatura neutra dopo la deumidificazione spinta.	Modello: Elettrico ad alta efficienza
Ventilatore E (ventilatore di mandata)	Ventilatore a portata variabile che spinge l'aria trattata all'interno del supermercato.	Portata: 3 m ³ /s
Chiller G (generatore primario)	Refrigeratore centrifugo raffreddato ad acqua che alimenta la batteria C.	Modello: DOE-Centrifugal. Capacità massima: 130 kW EER di riferimento: 3,2
Chiller F (Chiller virtuale)	Unità di supporto modellistica dedicata esclusivamente ad alimentare la batteria B per simulare il recupero energetico.	Capacità massima: 200 kW EER di riferimento: 3,5
Serbatoio I (accumulo termico)	Serbatoio inerziale che raccoglie l'energia termica recuperata dal Chiller G per destinarla ad altri usi (ACS).	Volume: 30 m ³ Limite temperatura massimo: 40 °C
Ventilatore H (torre di dissipazione)	Torre di raffreddamento che interviene per smaltire il calore residuo non accumulato dal serbatoio I.	Capacità nominale: 200 kW Portata acqua: 5 kg/s Temperatura ingresso acqua: 60°C

Tabella 34 – Dettaglio dei componenti dell'AWG

Modellazione del recuperatore di calore aria-aria

La macchina reale è dotata di un recuperatore di calore aria-aria che sfrutta l'aria fredda deumidificata in uscita per preraffreddare l'aria esterna in ingresso, riducendo il carico sensibile gravante sul circuito frigorifero principale. In ambiente DesignBuilder, tale scambio termico passivo è stato riprodotto mediante una modellazione virtuale finalizzata a garantire accuratezza numerica senza introdurre complessità eccessive nei circuiti idronici.

Il pre-raffreddamento è stato simulato tramite l'inserimento della batteria B, alimentata dal Chiller F, con funzione di abbattimento preliminare del carico sensibile e controllo basato sull'umidità relativa. A valle, una batteria elettrica di post-riscaldamento (batteria D) ripristina le condizioni di mandata dell'aria, evitando eccessivi scostamenti rispetto ai parametri di immissione desiderati.

Ai fini del bilancio energetico complessivo dell'AWG, i consumi elettrici associati al Chiller F e alla batteria D sono stati esclusi dal computo finale. Tale scelta metodologica consente di rappresentare l'effetto termico del recuperatore, ovvero la riduzione del carico sulla batteria di deumidificazione principale, senza alterare l'indice di prestazione globale del sistema con assorbimenti energetici che, nella configurazione reale, sono riconducibili a uno scambio interno di natura passiva.

Circuito di refrigerazione e curve prestazionali

Il Chiller G costituisce l'elemento centrale del sistema, responsabile della produzione frigorifera necessaria alla condensazione del vapore acqueo.

Al fine di garantire una simulazione dinamica coerente con le variazioni climatiche orarie, il comportamento del chiller è stato descritto mediante tre curve prestazionali:

- capacità frigorifera in funzione della temperatura esterna;
- EER in funzione della temperatura esterna;
- EER in funzione del carico parziale.

L'adozione di tali relazioni consente al software di aggiornare in tempo reale l'efficienza operativa dell'unità in funzione delle condizioni ambientali e del livello di carico, restituendo una stima attendibile dei consumi elettrici associati alla produzione idrica.

Produzione idrica e recupero termico

Il sistema AWG opera secondo una logica a duplice finalità: produzione di acqua e recupero energetico. La condensazione del vapore acqueo avviene sulla superficie della Coil C, alimentata dal Chiller G, dove si realizza il processo di deumidificazione necessario all'estrazione della risorsa idrica.

Contestualmente, il calore di condensazione non viene dissipato in atmosfera, ma recuperato attraverso un circuito ad acqua secondario. L'energia termica viene trasferita al serbatoio I. L'acqua riscaldata è impiegata per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'alimentazione delle batterie di post-riscaldamento delle unità di trattamento aria del supermercato.

In condizioni di eccedenza termica, il sistema di dissipazione provvede al rigetto del calore in eccesso, garantendo che la temperatura di ingresso al condensatore rimanga entro i limiti operativi (≤ 40 °C) e assicurando il mantenimento delle condizioni di sicurezza e di efficienza del chiller.

Infine, è stato creato un circuito ACS (Figura 38) per editare il "gruppo di uscita" che attua il calcolo della produzione di acqua in base all'equazione scritta nello script EMS. L'utilizzo di questo impianto fittizio è un modo per quantificare in

DesignBuilder la quantità di acqua prodotta, altrimenti non quantificabile dentro il software.

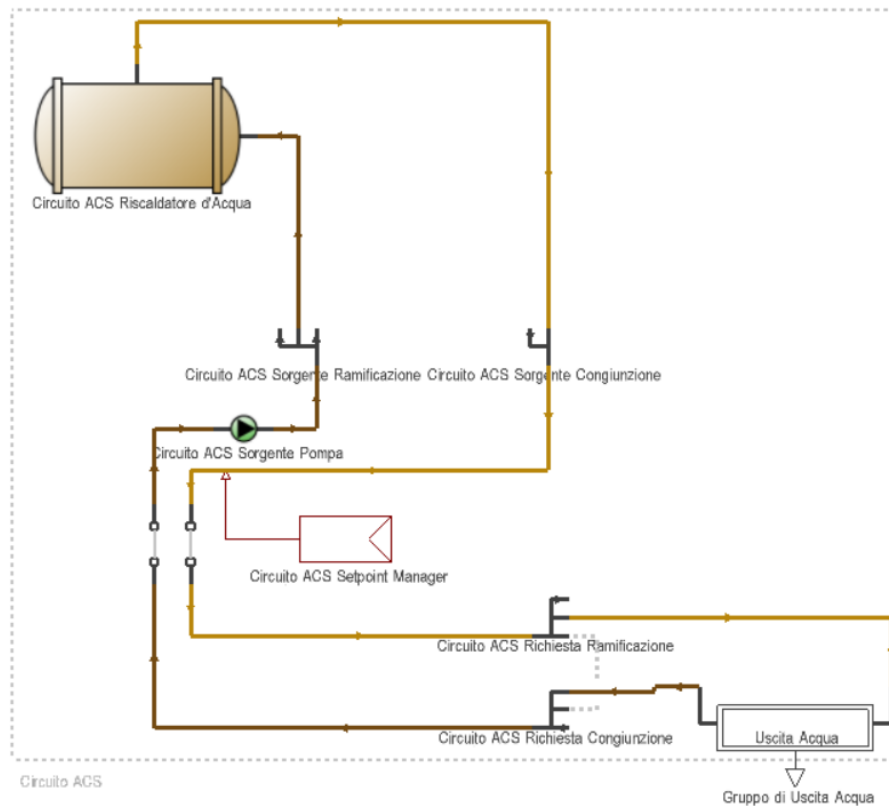


Figura 38 – Impianto per quantificare l'acqua prodotta dalla macchina AWG

Energy Management System (EMS)

Il software di simulazione energetica EnergyPlus, motore di calcolo alla base di DesignBuilder, opera generalmente tramite modelli predefiniti per i componenti impiantistici standard. Tuttavia, per sistemi innovativi o non ancora integrati nelle librerie commerciali, come i generatori d'acqua atmosferici (AWG), si rende necessario l'utilizzo dell'Energy Management System (EMS).

L'EMS è un ambiente di scripting avanzato basato sul linguaggio ERL (EnergyPlus Runtime Language). Esso permette di sovrascrivere le logiche di controllo standard e di implementare algoritmi personalizzati che vengono eseguiti ad ogni timestep della simulazione. Nel presente lavoro, l'EMS è stato utilizzato per trasformare il software da uno strumento di analisi puramente energetico-edilizia a un simulatore multi-fisico capace di accoppiare la termodinamica dell'aria alla produzione di risorsa idrica.

Obiettivi della modellazione

La necessità di ricorrere a un file EMS nasce dall'assenza di un modulo nativo per la condensazione dell'umidità atmosferica a fini di produzione idrica in DesignBuilder. Gli obiettivi principali della modellazione sono stati:

- Dinamicità della risposta: calcolare la produzione d'acqua in funzione delle fluttuazioni orarie di temperatura e umidità relativa.

- Integrazione energetica: valutare l'impatto dei consumi elettrici del compressore e dei ventilatori sul bilancio energetico totale dell'edificio.
- Recupero termico: stimare l'energia termica sottratta al flusso d'aria, utile per eventuali strategie di pre-raffrescamento o ventilazione meccanica controllata.

L'architettura del modello implementato si suddivide in quattro sezioni funzionali interconnesse, descritte di seguito.

- **Acquisizione dati:** il sistema monitora costantemente le variabili ambientali esterne e lo stato degli impianti. I sensori estraggono dal modello dati quali la temperatura a bulbo secco, il punto di rugiada, e la pressione atmosferica. Questi dati costituiscono i parametri di input per le equazioni di stato del sistema AWG.
- **Variabili Globali e Inizializzazione:** per garantire la stabilità numerica del calcolo, è stato predisposto un programma di inizializzazione che definisce i valori di default delle variabili di stato all'inizio di ogni periodo di simulazione.
- **Algoritmo di calcolo:** il cuore logico del modello risiede nel programma CalcoloAWG_Full. Esso esegue le seguenti operazioni:
 - **Analisi psicrometrica:** calcolo delle pressioni di vapore e dei rapporti di umidità specifica attraverso l'uso di funzioni psicrometriche integrate.
 - **Modellazione predittiva:** utilizzo di polinomi di regressione per determinare la portata massica d'aria e la temperatura di uscita del flusso. Tali formule permettono di simulare il comportamento reale della macchina in base alle condizioni operative.
 - **Bilancio entalpico:** calcolo dell'energia termica totale e della quota parte dedicata alla condensazione.
- **Retroazione sul modello:** i risultati del calcolo vengono reiniettati nel motore di simulazione tramite gli attuatori. Questi componenti sovrascrivono i valori degli Schedules di sistema, imponendo al modello i consumi elettrici calcolati e le temperature dell'aria trattata, influenzando così il comportamento termico degli ambienti serviti.
- **Analisi degli output e unità di misura:** il modello restituisce variabili di output fondamentali per l'analisi prestazionale.

9.6.2. INTRODUZIONE DI UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Il sistema AWG è molto energivoro e per compensare questo aumento dei consumi elettrici è stato inserito un impianto fotovoltaico a servizio del supermercato (Figura 39).

La configurazione è stata modellata e simulata tramite il software DesignBuilder, utilizzando i dati climatici giornalieri di radiazione solare.

La copertura dell'edificio presenta dimensioni pari a 2400 m²; in linea con le installazioni tipiche della Grande Distribuzione Organizzata (GDO) è stato occupato il 40% della superficie totale, circa 960 m², considerando area lorda comprensiva degli spazi tecnici tra le file.

Il campo è costituito da:

- Nove file parallele
- Lunghezza fila: 54 m
- Altezza fila: 2 m
- Inclinazione moduli: 30°
- Orientamento: Sud (azimut 0°)
- Distanza tra le file: 1,6 m (calcolata per evitare ombreggiamento invernale)

Il layout è stato progettato per massimizzare la captazione invernale (periodo critico per l'AWG) e minimizzare le perdite.

Rendimento considerato in simulazione

Ai fini della modellazione energetica su DesignBuilder è stato assunto un rendimento dei pannelli fotovoltaici pari al 25%, calcolato rispetto alla radiazione solare incidente giornaliera.

Tale valore include:

- Perdite per temperatura
- Perdite inverter
- Perdite cablaggio
- Perdite per mismatch
- Perdite per polvere e degrado

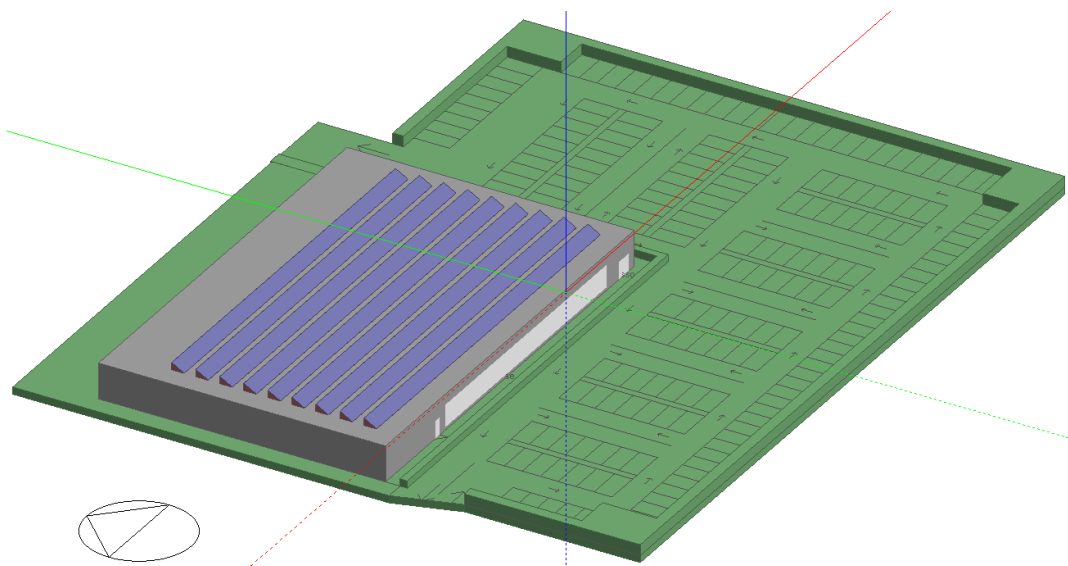


Figura 39 – Modello del supermercato con l'impianto fotovoltaico

9.6.3. ANALISI DEI RISULTATI CON INTERVENTI MIGLIORATIVI (AWG E FV)

Nel presente capitolo vengono analizzati i risultati ottenuti dalla simulazione energetica del caso studio, considerando l'integrazione della macchina AWG e dell'impianto fotovoltaico. L'obiettivo è valutare le prestazioni del sistema rispetto alla configurazione di riferimento priva di AWG, evidenziando le variazioni nei consumi energetici, negli indicatori di prestazione, nell'impatto ambientale, nel comfort interno e nella convenienza economica.

Boiler Heating Rate

Il Boiler Heating Rate rappresenta l'energia termica utile erogata dalla caldaia verso l'impianto di distribuzione.

In questa parte di sistema l'aggiunta dello scambiatore di calore che preriscalda l'acqua prima dell'ingresso in caldaia ha permesso di diminuire i consumi del 55,9 %. Questo sistema riesce a riscaldare l'acqua grazie al calore prodotto dalla macchina AWG.

Dalla simulazione svolta sono emersi i seguenti valori annuali (Tabella 35).

ENERGIA TERMICA UTILE CON AWG E FV			
Milano	27678,263 kWh	11,944 kWh/m ²	

Tabella 35 – Energia termica annuale con AWG a Milano

Come si può notare dal grafico sottostante (Grafico 28) l'uso della caldaia con l'aggiunta del sistema AWG è molto più limitato e durante l'estate il solo scambiatore di calore riesce a coprire tutto il fabbisogno termico.

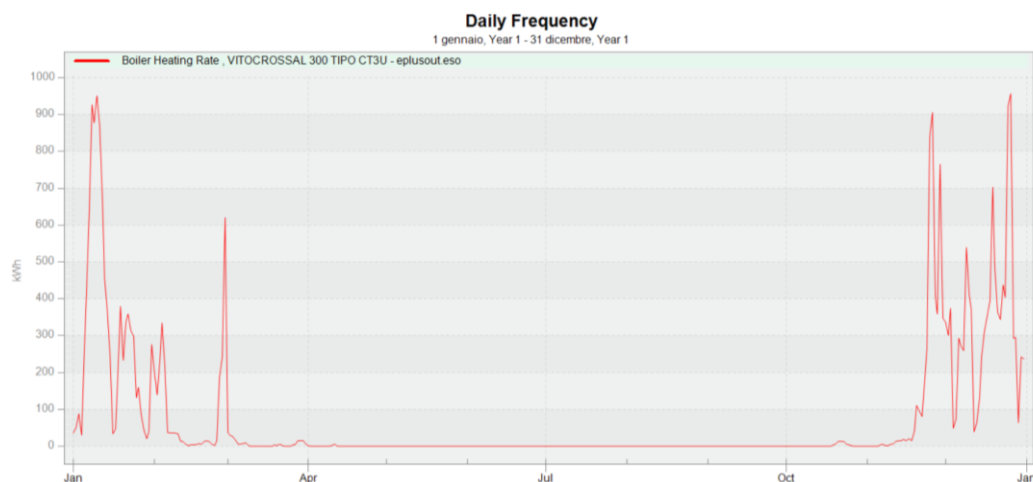


Grafico 28 – Energia termica giornaliera con AWG a Milano

Boiler NaturalGas Rate

Come il Boiler Heating Rate anche il Boiler NaturalGas Rate è notevolmente diminuito (Tabella 36); diminuzione del 47,5 % portata anch'essa dall'aggiunta dello scambiatore di calore.

Dalla simulazione emerge un valore di Boiler NaturalGas Rate pari a:

ENERGIA DEL COMBUSTIBILE IN INGRESSO CON AWG E FV			
Milano	30686,060 kWh	13,242 kWh/m ²	

Tabella 36 – Energia del combustibile annua con AWG a Milano

Con un andamento giornaliero rappresentato nel Grafico 29.

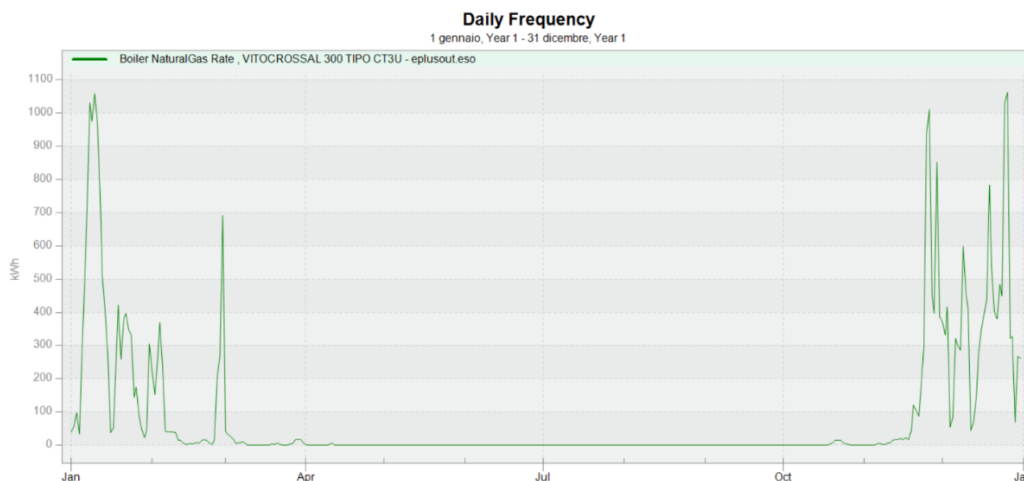


Grafico 29 – Energia del combustibile giornaliera con AWG a Milano

Calcolo del consumo orario di gas naturale

Il software fornisce come output il termine Boiler NaturalGas Rate [W], ma per avere la grandezza espressa in termini volumetrici bisogna convertirla come nel caso precedente. Essendo il Boiler NaturalGas diminuito del 47,5 % anche il consumo di gas naturale espresso in Sm³ sarà diminuito della stessa percentuale (Tabella 37).

Dal valore precedentemente citato a seguito dei calcoli si ottiene:

CONSUMO DI GAS NATURALE CON AWG E FV			
Milano	3096,474 Sm ³	1,336 Sm ³ /m ²	

Tabella 37 – Consumo di gas naturale annuo con AWG a Milano

Calore prodotto dalla macchina AWG

La macchina AWG produce una certa quantità di calore grazie al suo refrigeratore (Tabella 38). Nel caso studio la quantità di calore prodotto deriva dalla somma del Chiller Total Heat Energy (Grafico 30) del refrigeratore della macchina AWG e dal Cooling Tower Heat Transfer Rate (Grafico 31) valore che deriva dalla torre di dissipazione del refrigeratore della macchina.

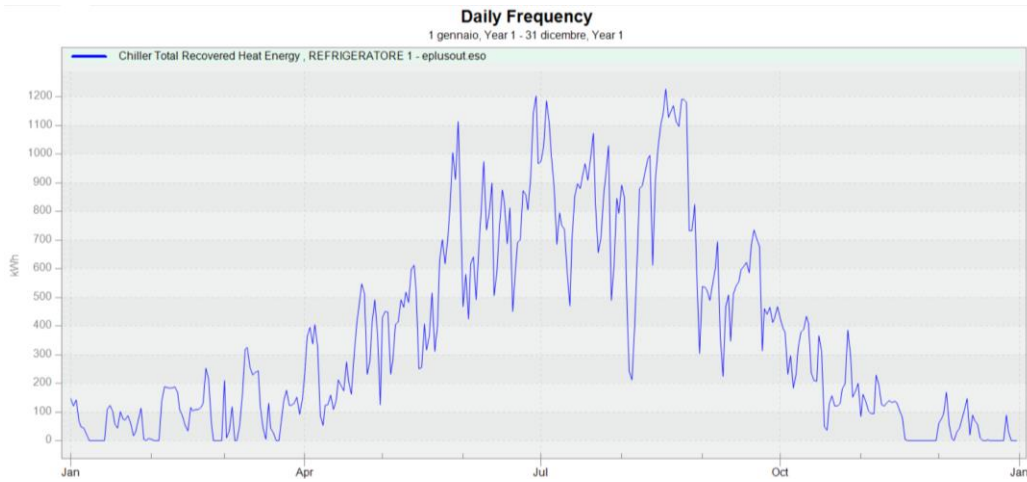


Grafico 30 – Calore recuperato dal refrigeratore principale

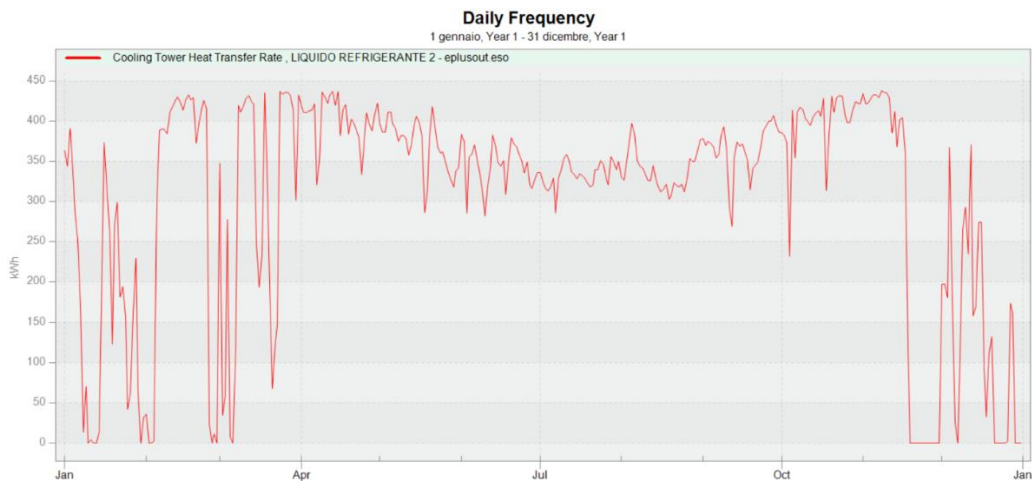


Grafico 31 – Calore fornito dal condensatore dell'AWG

Assieme questi dati creano il valore di:

CALORE PRODOTTO DA AWG		
Milano	246638,067 kWh	106,435 kWh/m ²

Tabella 38 – Calore prodotto totale annuo dall'AWG a Milano

Distribuito durante l'anno come mostrato nel Grafico 32.



Grafico 32 – Calore prodotto totale giornaliero dall'AWG a Milano

Calore recuperato dalla macchina AWG

Di questo valore prodotto solo una parte viene recuperato dal circuito di recupero che trasferisce il calore al serbatoio che a sua volta lo trasferisce allo scambiatore di calore.

Il calore recuperato risulta essere il valore del Chiller Total Heat Energy (Tabella 39).

CALORE RECUPERATO DA AWG			
Milano	134974,996	kWh	58,248 kWh/m ²

Tabella 39 – Calore recuperato dall'AWG annuo a Milano

La percentuale di calore recuperato varia a seconda della temperatura esterna; giornalmente varia nel modo espresso dal grafico sottostante (Grafico 33).

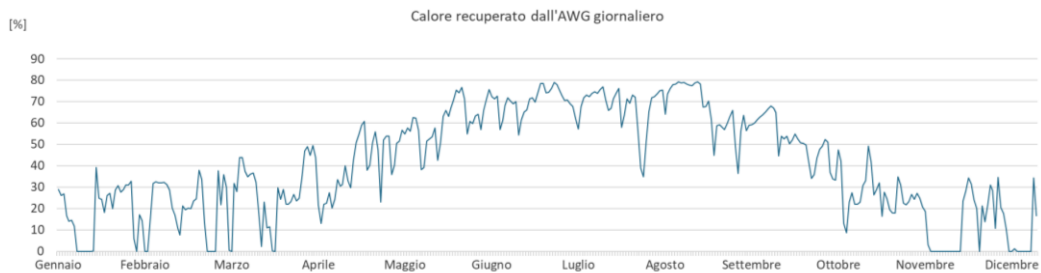


Grafico 33 – Calore recuperato dall'AWG giornaliero a Milano

Chiller EER

Questa è la parte di sistema che ha visto il maggior cambiamento in termini di impianto con l'aggiunta del refrigeratore della macchina AWG che collabora con il principale.

- **Principale Daikin EWWQ380B-SS**

l'Energy Efficiency Ratio è il rapporto tra l'energia frigorifera utile prodotta e l'energia elettrica assorbita dal gruppo frigorifero, in questo caso varia di poco rispetto al caso senza AWG (Grafico 34).

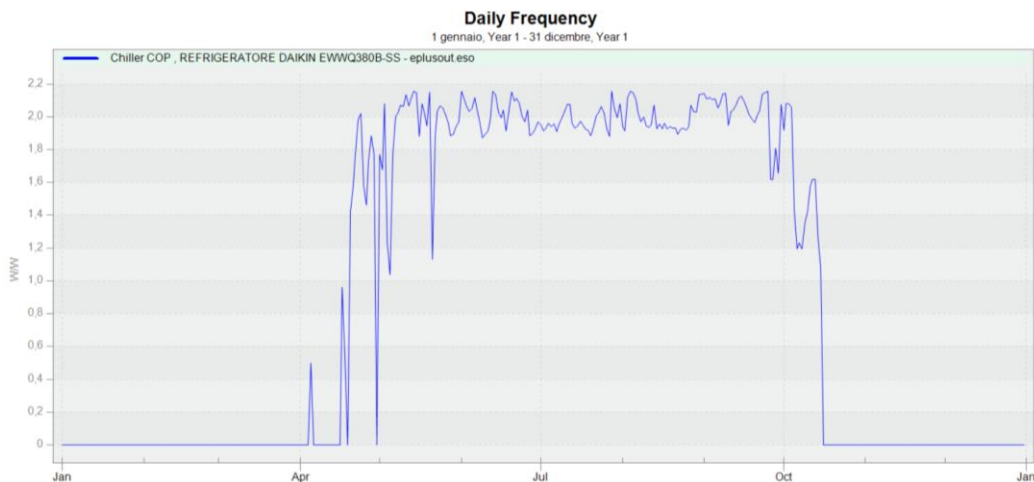


Grafico 34 – EER del refrigeratore principale con AWG a Milano

- **Refrigeratore AWG**

In questo refrigeratore abbiamo un EER maggiore e durante tutto l'anno in quanto la macchina AWG lavora sempre anche in inverno (Grafico 35).

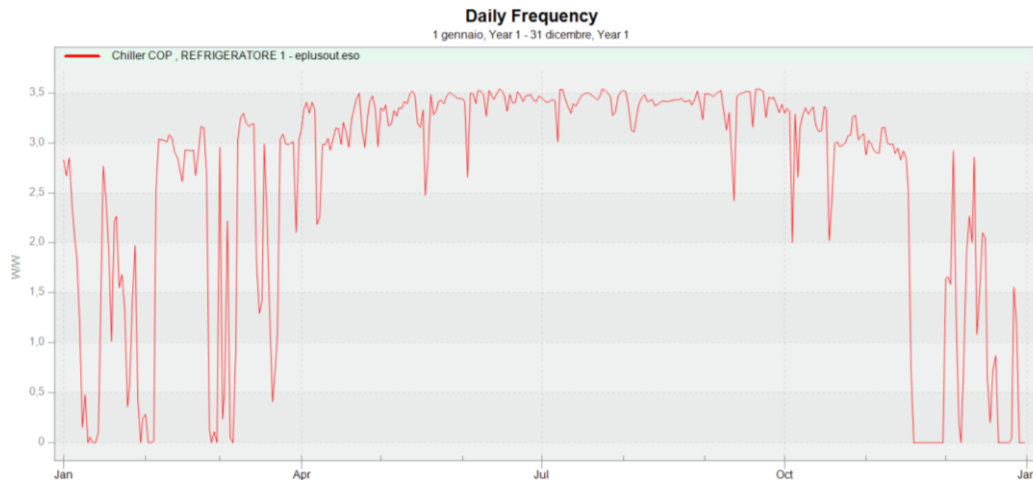


Grafico 35 – EER del refrigeratore dell'AWG a Milano

Chiller Electricity Rate

- **Principale Daikin EWWQ380B-SS**

L'energia elettrica istantanea assorbita dal gruppo frigorifero principale è diminuita dell' 7,9 % (Tabella 40).

ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DAL CHILLER			
Milano	31424,830 kWh	13,561 kWh/m ²	

Tabella 40 – Energia elettrica annua assorbita dal refrigeratore principale con AWG a Milano

Distribuito durante l'anno come mostrato nel Grafico 36.

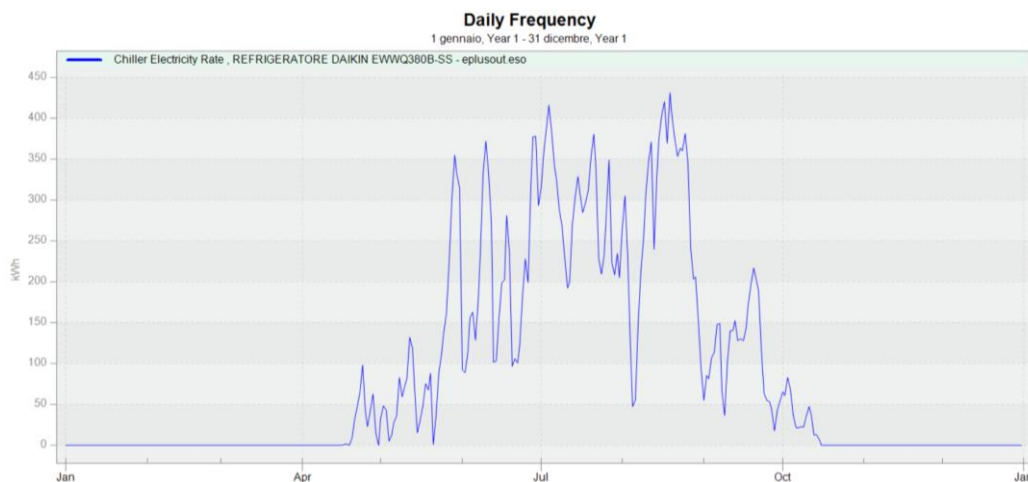


Grafico 36 – Energia elettrica giornaliera assorbita dal refrigeratore principale con AWG a Milano

- **Refrigeratore AWG**

In questo caso vediamo che il refrigeratore dell'AWG lavorando tutto l'anno assorbe molta energia elettrica (Tabella 41). A causa di questo consumo eccessivo l'impianto deve essere sostenuto da un sistema fotovoltaico associato.

ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DAL CHILLER AWG			
Milano	43124,954 kWh	18,610 kWh/m ²	

Tabella 41 – Energia elettrica annua assorbita dal refrigeratore dell'AWG a Milano

Distribuito durante l'anno come mostrato nel Grafico 37.

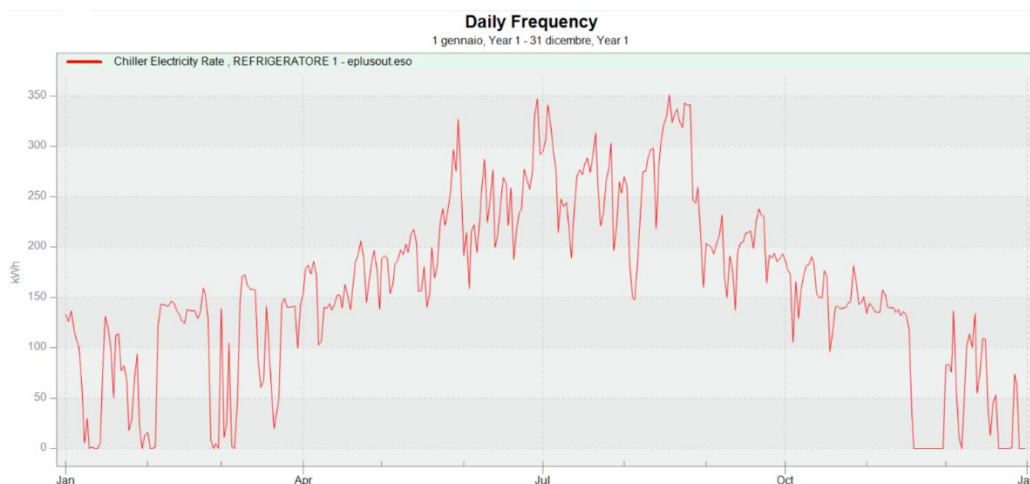


Grafico 37 – Energia elettrica giornaliera assorbita dal refrigeratore dell'AWG a Milano

Sommando assieme i due consumi elettrici si ottiene il consumo elettrico completo dell'impianto di raffreddamento (Tabella 42). Ottenendo il seguente risultato:

ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DAI CHILLER			
Milano	74549,784 kWh	32,172 kWh/m ²	

Tabella 42 – Energia elettrica totale annua assorbita dai refrigeratori con AWG a Milano

Così distribuito durante l'anno (Grafico 38).

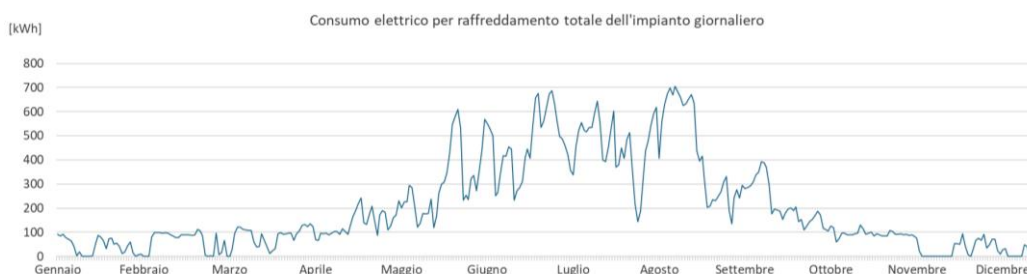


Grafico 38 – Energia elettrica totale giornaliera assorbita dai refrigeratori con AWG a Milano

Chiller Evaporator Cooling Rate

- **Principale Daikin EWWQ380B-SS**

L'energia frigorifera utile fornita all'impianto principale diminuisce dell' 8,8 % (Tabella 43) attestandosi a:

ENERGIA FRIGORIFERA FORNITA DAL CHILLER			
Milano	106018,346 kWh	45,752 kWh/m ²	

Tabella 43 – Energia frigorifera annua fornita dal refrigeratore principale con AWG a Milano

Con una distribuzione annuale esposta nel Grafico 39.

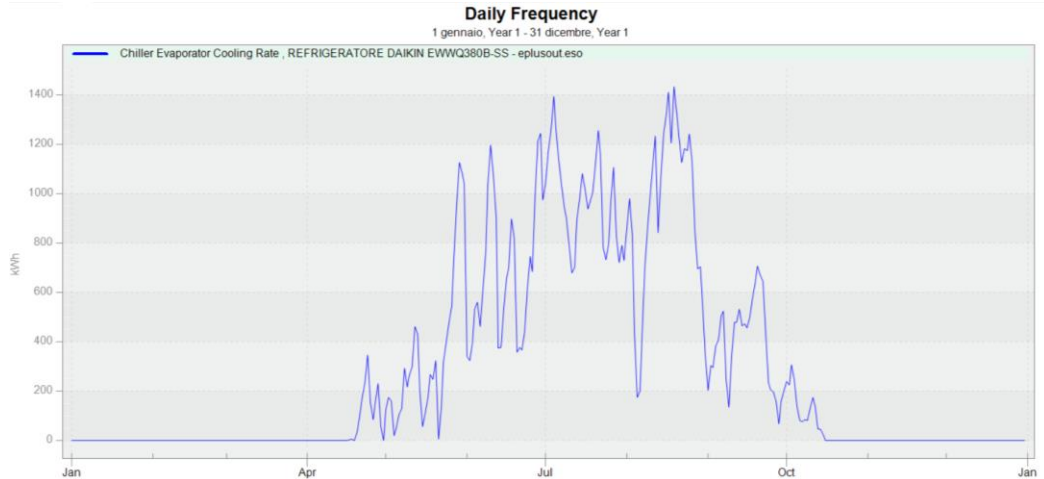


Grafico 39 – Energia frigorifera giornaliera fornita dal refrigeratore principale con AWG a Milano

- **Refrigeratore AWG**

Come spiegato in precedenza la macchina AWG produce acqua e recupera calore durante tutto l'anno, quindi, rimane sempre in funzione e questo porta ad una produzione di raffrescamento anche in inverno (Tabella 44).

ENERGIA FRIGORIFERA FORNITA DAL CHILLER AWG			
Milano	188892,928 kWh	81,516 kWh/m ²	

Tabella 44 – Energia frigorifera annua fornita dal refrigeratore dell'AWG a Milano

Con una distribuzione annuale esposta nel Grafico 40.

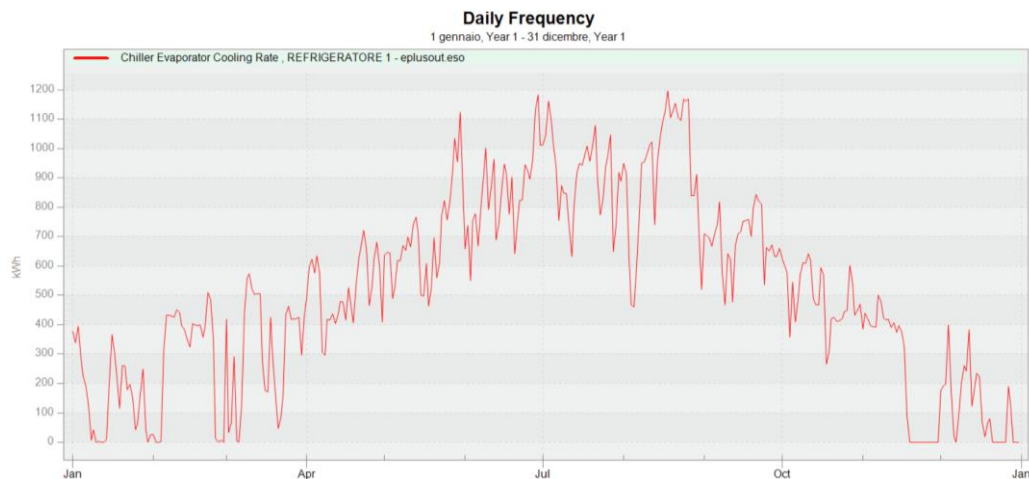


Grafico 40 – Energia frigorifera giornaliera fornita dal refrigeratore principale con AWG a Milano

Sommando i due dati si ottiene l'energia frigorifera totale dell'intero impianto (Tabella 45).

ENERGIA FRIGORIFERA FORNITA DAI CHILLER			
Milano	294911,274 kWh	127,267 kWh/m ²	

Tabella 45 – Energia frigorifera totale annua fornita dai refrigeratori con AWG a Milano

Così distribuito durante l'anno (Grafico 41).



Grafico 41 – Energia frigorifera totale annua fornita dai refrigeratori con AWG a Milano

Produzione elettrica

L'impianto fotovoltaico installato contribuisce in modo significativo al bilancio energetico complessivo, fornendo una quota di energia elettrica rinnovabile che permette di compensare, almeno in parte, l'aumento dei consumi elettrici introdotto dall'AWG (Tabella 46).

La produzione elettrica risulta coerente con le condizioni climatiche del sito e consente di ridurre il prelievo di energia dalla rete, migliorando l'autosufficienza energetica dell'edificio.

ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA			
Milano	323122,550 kWh	139,442 kWh/m ²	

Tabella 46 – Energia elettrica annua prodotta a Milano

Produzione che risulta distribuita in questo modo durante l'anno (Grafico 42).

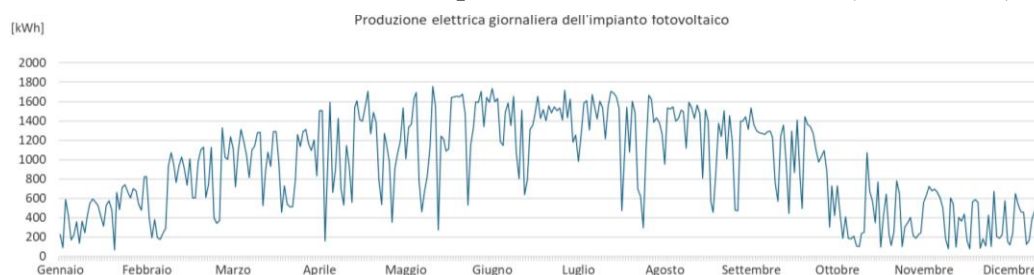


Grafico 42 – Energia elettrica giornaliera prodotta a Milano

Energy Use Intensity (EUI)

Grazie alla presenza della macchina AWG e dei pannelli solari L'Energy Use Intensity (EUI) possiede anche un valore netto in quanto il supermercato non è più solo un consumatore ma anche un produttore di energia (Tabella 47).

- Net Energy (Energia Netta) è la differenza tra l'energia consumata e quella prodotta

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	862847.05	372.34
Net Site Energy	539724.50	232.90
Total Source Energy	2668717.55	1151.60
Net Source Energy	1645388.43	710.02

Tabella 47 – Valori annui del EUI con AWG a Milano

Come si può osservare si ha un aumento di energia consumata (Tabella 48) causato dalla macchina AWG che, come detto nei capitoli precedenti, è molto energivora.

Il sistema fotovoltaico aiuta a contenere questo aumento portandolo al 19% dell'energia consumata al sito (Tabella 49), ricordando che è stato inserito solo su una porzione di superficie per rimanere in linea con i casi reali analizzati.

ENERGIA PRIMARIA			
Milano	Totale	103,08	%
	Netta	25,21	%

Tabella 48 – Aumento dell'energia primaria con AWG rispetto a senza a Milano

ENERGIA AL SITO CONSUMATA			
Milano	Totale	90,46	%
	Netta	19,14	%

Tabella 49 – Aumento dell'energia al sito con AWG rispetto a senza a Milano

Produzione di CO₂

La produzione di CO₂ è stata calcolata utilizzando i fattori medi italiani ISPRA (Tabella 50).

Essendo aumentata la corrente elettrica utilizzata di conseguenza si evidenzia un conseguente aumento della produzione di CO₂ per l'elettricità ma si osserva anche una diminuzione della produzione di CO₂ per il gas naturale grazie al minore consumo (Tabella 51).

Ottenendo i seguenti risultati:

PRODUZIONE DI CO ₂			
Fattori medi italiani ISPRA	Elettricità	0,28	kgCO ₂ /kWh
	Gas	1,97	kgCO ₂ /Sm ³
CO ₂ prodotta per l'elettricità		233005,1	kgCO ₂
CO ₂ prodotta per gas naturale		6100,054	kgCO ₂

Tabella 50 – Produzione di CO₂ annua con AWG a Milano

Che portano un aumento percentuale del:

AUMENTO DELLA PRODUZIONE DI CO ₂			
Milano	Per l'elettricità	110,60	%
	Per gas naturale	-46,99	%

Tabella 51 – Aumento della produzione di CO₂ annua con AWG rispetto a senza a Milano

Comfort termico

L'analisi del comfort termico evidenzia variazioni limitate rispetto al caso di riferimento, indicando che l'integrazione della macchina AWG non compromette le condizioni interne dell'edificio (Tabella 52).

Le eventuali differenze riscontrate risultano contenute e compatibili con il normale funzionamento dell'impianto, confermando la capacità del sistema di garantire adeguati livelli di benessere termo-igrometrico per gli occupanti.

Comfort and Setpoint Not Met Summary

	Facility [Hours]
Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	7.00
Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	1.00
Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3600.00

Tabella 52 – Ore annue di disagio termico con AWG a Milano

Produzione di acqua

Lo scopo principale di questa tecnologia è la produzione di acqua attraverso la condensazione dell'aria. Nel caso in analisi, utilizzando una macchina di media grandezza, sono stati prodotti i seguenti litri d'acqua durante l'anno (Tabella 53):

ACQUA PRODOTTA			
Milano	144946,09	l	62,55
			l/m ²

Tabella 53 – Quantità annua di acqua prodotta a Milano

La produzione di questi litri d'acqua, come abbiamo già visto, varia molto a seconda del clima esterno per questo durante l'estate, quando le temperature sono maggiori, si ha una maggiore produzione con picchi di 900 l/giorno (Grafico 43).

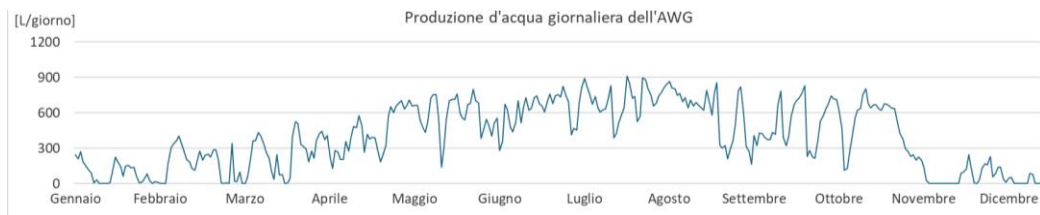


Grafico 43 – Quantità giornaliera di acqua prodotta a Milano

Analisi economica

In questa fase si va a valutare solo il risparmio economico dell'impianto integrato HVAC-AWG trascurando tutti gli altri consumi interni al supermercato.

Per far comprendere meglio il consumo economico della macchina e il risparmio totale dell'impianto si è deciso di vedere due casistiche:

- **Solo AWG senza fotovoltaico**

In questo caso si ha una diminuzione del costo complessivo del gas naturale ma un aumento del costo per la corrente elettrica.

Diminuzione e aumenti mensili visibili nella tabella sottostante (Tabella 54).

Risparmi mensili senza FV			
Mese	Gas	Elettricità	Totale
Gennaio	561,58 €	-353,23 €	208,35 €
Febbraio	350,71 €	-499,83 €	-149,12 €
Marzo	59,02 €	-575,63 €	-516,61 €
Aprile	40,04 €	-898,85 €	-858,81 €
Maggio	51,37 €	-1.240,43 €	-1.189,06 €
Giugno	59,39 €	-1.419,29 €	-1.359,91 €
Luglio	69,68 €	-1.549,71 €	-1.480,03 €
Agosto	65,53 €	-1.668,88 €	-1.603,35 €
Settembre	55,47 €	-1.130,55 €	-1.075,08 €
Ottobre	48,69 €	-882,80 €	-834,11 €
Novembre	164,48 €	-418,89 €	-254,41 €
Dicembre	642,74 €	-277,98 €	364,76 €
TOT	2.168,70 €	-10.916,09 €	-8.747,39 €

Tabella 54 – Risparmi mensili con AWG senza FV a Milano

A causa di questi cambiamenti si andrebbe a pagare in totale 8.747,39 € in più alla fine dell'anno (Tabella 55).

COSTI mensili			
Mese	Gas	Elettricità	Totale
Gennaio	865,87 €	353,23 €	1.219,10 €
Febbraio	219,07 €	499,83 €	718,90 €
Marzo	18,88 €	575,63 €	594,50 €
Aprile	1,00 €	1.021,50 €	1.022,49 €
Maggio	0,00 €	2.163,46 €	2.163,46 €
Giugno	0,00 €	3.228,69 €	3.228,69 €
Luglio	0,00 €	4.238,98 €	4.238,98 €
Agosto	0,00 €	4.205,03 €	4.205,03 €
Settembre	0,00 €	2.106,05 €	2.106,05 €
Ottobre	5,54 €	1.039,17 €	1.044,71 €
Novembre	401,61 €	418,89 €	820,50 €
Dicembre	934,25 €	277,98 €	1.212,23 €
TOT	2.446,21 €	20.128,44 €	22.574,66 €

Tabella 55 – Costi mensili con AWG senza FV a Milano

- **Impianto completo di AWG e fotovoltaico**

In questo caso il risparmio economico derivante dal minore consumo di gas rimane invariato ma grazie al fotovoltaico i costi maggiori dell'elettricità vengono completamente azzerati arrivando perfino a produrre più di quanto venga utilizzato dall'impianto stesso.

Diminuzione e aumenti mensili visibili nella tabella sottostante (Tabella 56).

Risparmi mensili con FV			
Mese	Gas	Elettricità	Totale
Gennaio	561,58 €	3.458,86 €	4.020,43 €
Febbraio	350,71 €	4.759,13 €	5.109,85 €
Marzo	59,02 €	7.516,93 €	7.575,95 €
Aprile	40,04 €	8.283,28 €	8.323,32 €
Maggio	51,37 €	8.850,34 €	8.901,71 €
Giugno	59,39 €	9.601,09 €	9.660,47 €
Luglio	69,68 €	10.374,58 €	10.444,27 €
Agosto	65,53 €	8.972,27 €	9.037,80 €
Settembre	55,47 €	8.171,75 €	8.227,22 €
Ottobre	48,69 €	4.834,53 €	4.883,22 €
Novembre	164,48 €	2.877,38 €	3.041,86 €
Dicembre	642,74 €	2.628,38 €	3.271,12 €
TOT	2.168,70 €	80.328,53 €	82.497,22 €

Tabella 56 – Risparmi mensili con AWG e FV a Milano

Grazie all'aggiunta dell'impianto fotovoltaico si arriva perfino a guadagnare (Tabella 57).

QUANTO PAGO EFFETTIVAMENTE			
Mese	Gas	Elettricità	Totale
Gennaio	865,87 €	-3.458,86 €	-2.592,99 €
Febbraio	219,07 €	-4.759,13 €	-4.540,06 €
Marzo	18,88 €	-7.516,93 €	-7.498,06 €
Aprile	1,00 €	-8.160,64 €	-8.159,64 €
Maggio	0,00 €	-7.927,31 €	-7.927,31 €
Giugno	0,00 €	-7.791,69 €	-7.791,69 €
Luglio	0,00 €	-7.685,32 €	-7.685,32 €
Agosto	0,00 €	-6.436,12 €	-6.436,12 €
Settembre	0,00 €	-7.196,25 €	-7.196,25 €
Ottobre	5,54 €	-4.678,17 €	-4.672,63 €
Novembre	401,61 €	-2.877,38 €	-2.475,77 €
Dicembre	934,25 €	-2.628,38 €	-1.694,13 €
TOT	2.446,21 €	-71.116,17 €	-68.669,96 €

Tabella 57 – Costi mensili con AWG e FV a Milano

L'aumento del consumo energetico complessivo non implica necessariamente un incremento dei costi elettrici, poiché questi dipendono dalla quota di energia effettivamente acquistata dalla rete. Nel caso analizzato, l'introduzione del sistema AWG comporta un maggiore fabbisogno elettrico, ma tale incremento è in parte

coperto dall'autoproduzione fotovoltaica, caratterizzata da costo marginale nullo. Inoltre, si verifica uno spostamento dei consumi da fonti più costose (gas naturale) a energia elettrica parzialmente autoprodotta. Di conseguenza, pur in presenza di un aumento dell'energia totale richiesta, si osserva una riduzione dei costi complessivi.

9.7. CONSIDERAZIONI SUGLI INTERVENTI MIGLIORATIVI

L'analisi dei risultati ottenuti per il caso studio di Milano evidenzia che l'integrazione della macchina AWG nel sistema HVAC produce effetti significativi ma non univoci. Da un lato, il recupero termico consente una riduzione consistente del contributo richiesto alla caldaia, con una conseguente diminuzione dei consumi di gas naturale; dall'altro, l'AWG introduce un fabbisogno elettrico aggiuntivo non trascurabile, legato al funzionamento del proprio refrigeratore.

Ne deriva che il beneficio complessivo della soluzione non dipende soltanto dalla presenza dell'AWG, ma soprattutto dalla possibilità di compensarne l'elevato assorbimento elettrico mediante un adeguato sistema fotovoltaico. In questo senso, il sistema integrato AWG+FV trasforma l'edificio da semplice consumatore a sistema energeticamente più bilanciato, capace di ridurre il prelievo di energia da fonti convenzionali e di migliorare il bilancio economico complessivo.

Dal punto di vista prestazionale, il comfort interno rimane sostanzialmente invariato rispetto al caso privo di AWG, confermando che la nuova configurazione impiantistica non compromette le condizioni ambientali dell'edificio. Inoltre, la produzione idrica della macchina risulta coerente con l'obiettivo tecnologico perseguito, anche se fortemente dipendente dalle condizioni climatiche stagionali, con valori più elevati nei mesi caldi.

Nel complesso, i risultati mostrano che la soluzione proposta è tecnicamente efficace, ma realmente conveniente solo se accompagnata da una quota sufficiente di produzione fotovoltaica, capace di compensare l'aumento dei consumi elettrici e di rendere sostenibile l'intervento sotto il profilo energetico, ambientale

9.8. INFLUENZA DEL CONTESTO CLIMATICO CON IMPIANTO AWG E FV

Soprattutto in questo caso il contesto climatico gioca un ruolo fondamentale per la buona rendita dell'impianto integrato.

Consumi energetici annuali

L'analisi dei consumi energetici evidenzia un comportamento differenziato tra le tre località considerate, strettamente legato alle diverse esigenze di riscaldamento e raffrescamento.

Nel caso di Milano, il risparmio di gas naturale (Tabella 58) risulta il più contenuto tra gli scenari analizzati. Questo comportamento è riconducibile al clima più freddo, che richiede un maggiore apporto termico per il riscaldamento e limita l'efficacia del recupero energetico associato all'AWG. Di conseguenza, anche la riduzione dell'energia termica utile fornita dalla caldaia risulta inferiore rispetto agli altri casi (Tabella 59) (Tabella 60). Dal punto di vista frigorifero, si osserva un risparmio intermedio (Tabella 61) (Tabella 62), mentre l'incremento del consumo elettrico

complessivo è il più contenuto (Tabella 63), indicando un minore utilizzo della macchina AWG.

Il caso di Roma rappresenta lo scenario più favorevole. Le condizioni climatiche consentono infatti di massimizzare il recupero termico, determinando la maggiore riduzione dei consumi di gas naturale e dell'energia termica richiesta. Il risparmio sulla produzione frigorifera del sistema principale risulta in linea con quello osservato a Milano, ma si registra un incremento più marcato dei consumi elettrici complessivi, imputabile al maggiore utilizzo della macchina AWG.

Bari presenta un comportamento intermedio. Il risparmio di gas naturale e di energia termica è significativo, ma inferiore rispetto a Roma. Al contrario, i benefici sul lato frigorifero risultano più limitati e si osserva comunque un aumento consistente dei consumi elettrici, segno di un funzionamento rilevante dell'AWG in condizioni meno ottimali rispetto al caso romano.

RISPARMIO CONSUMO DI GAS NATURALE		
Milano	46,99	%
Roma	84,69	%
Bari	75,73	%

Tabella 58 – Percentuale di gas naturale risparmiato con AWG rispetto a senza AWG

RISPARMIO ENERGIA TERMICA UTILE		
Milano	55,93	%
Roma	87,34	%
Bari	80,02	%

Tabella 59 – Percentuale di energia termica utile risparmiata con AWG rispetto a senza AWG

RISPARMIO ENERGIA DEL COMBUSTIBILE IN INGRESSO		
Milano	46,99	%
Roma	84,69	%
Bari	75,73	%

Tabella 60 – Percentuale di energia del combustibile risparmiata con AWG rispetto a senza AWG

RISPARMIO ENERGIA FRIGORIFERA FORNITA DAL CHILLER PRINCIPALE		
Milano	8,83	%
Roma	9,27	%
Bari	6,90	%

Tabella 61 – Percentuale di energia frigorifera fornita dal chiller principale risparmiata con AWG rispetto a senza AWG

RISPARMIO ENERGIA ELETTRICA ASSORBITA DAL CHILLER PRINCIPALE		
Milano	7,90	%
Roma	7,62	%
Bari	5,42	%

Tabella 62 – Percentuale di energia elettrica assorbita dal chiller principale risparmiata con AWG rispetto a senza AWG

AUMENTO DEL CONSUMO ELETTRICO TOTALE		
Milano	110,60	%
Roma	157,80	%
Bari	153,93	%

Tabella 63 – Percentuale di aumento del consumo elettrico totale con AWG rispetto a senza AWG

Produzione elettrica

La produzione di energia elettrica da impianto fotovoltaico risulta fortemente dipendente dalla radiazione solare disponibile nelle diverse località. Coerentemente con i dati climatici analizzati, Roma presenta la maggiore producibilità annua, seguita da Bari e infine da Milano (Tabella 64).

Questo aspetto assume un ruolo fondamentale nell'equilibrio energetico complessivo del sistema, in quanto contribuisce a compensare l'aumento dei consumi elettrici introdotto dalla macchina AWG.

ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA				
Milano	323122,550	kWh	139,442	kWh/m ²
Roma	372379,110	kWh	160,698	kWh/m ²
Bari	353502,370	kWh	152,552	kWh/m ²

Tabella 64 – Energia elettrica annua prodotta

Energy Use Intensity (EUI)

L'analisi dell'indicatore EUI evidenzia un incremento in tutti gli scenari considerati, a conferma dello spostamento del fabbisogno energetico verso il vettore elettrico (Tabella 65).

Milano mostra l'aumento più contenuto, coerentemente con il minore incremento dei consumi elettrici. Roma presenta invece l'incremento più elevato, dovuto al maggiore utilizzo della macchina AWG, mentre Bari si colloca in una posizione intermedia.

Questi risultati evidenziano come l'integrazione dell'AWG, pur riducendo i consumi termici, comporti un aumento dell'energia primaria richiesta (Tabella 66), rendendo necessario il contributo di fonti rinnovabili per migliorare il bilancio complessivo.

AUMENTO ENERGIA AL SITO CONSUMATA			
Milano	Totale	90,46	%
	Netta	19,14	%
Roma	Totale	135,32	%
	Netta	36,06	%
Bari	Totale	128,40	%
	Netta	33,93	%

Tabella 65 – Aumento totale annuo dell'energia al sito con AWG rispetto che senza

AUMENTO ENERGIA PRIMARIA			
Milano	Totale	103,08	%
	Netta	25,21	%
Roma	Totale	149,61	%
	Netta	43,90	%
Bari	Totale	144,50	%
	Netta	42,58	%

Tabella 66 – Aumento totale annuo dell'energia primaria con AWG rispetto che senza

Produzione di CO₂.

Dal punto di vista ambientale, l'introduzione della macchina AWG determina effetti contrastanti. In tutti i casi analizzati si osserva una riduzione delle emissioni associate al consumo di gas naturale, dovuta al minor utilizzo della caldaia.

Tuttavia, tale beneficio è compensato da un aumento delle emissioni legate al maggiore consumo di energia elettrica. Il bilancio complessivo delle emissioni risulta quindi fortemente dipendente dal mix energetico e dalla quota di energia rinnovabile disponibile, evidenziando ancora una volta il ruolo strategico dell'impianto fotovoltaico (Tabella 67).

AUMENTO DELLA PRODUZIONE DI CO ₂			
Milano	Per l'elettricità	110,60	%
	Per gas naturale	-46,99	%
Roma	Per l'elettricità	157,80	%
	Per gas naturale	-84,69	%
Bari	Per l'elettricità	153,93	%
	Per gas naturale	-75,73	%

Tabella 67 – Aumento totale annuo della produzione di CO₂ con AWG rispetto che senza

Comfort termico

L'analisi del comfort termico mostra variazioni limitate rispetto al caso di riferimento senza AWG, indicando che l'integrazione della nuova tecnologia non compromette le condizioni interne dell'edificio.

Nei casi di Milano e Bari, il disagio termico risulta prevalentemente concentrato nella stagione invernale, a causa dei maggiori fabbisogni di riscaldamento. Roma evidenzia invece il comportamento più equilibrato, con il minor numero complessivo di ore di disagio (Tabella 68).

ORE DI DISAGIO		
Milano	Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	7,0 h
	Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	1,0 h
	Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3600,0 h
Roma	Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	1,5 h
	Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	2,0 h
	Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3430,8 h
Bari	Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	7,3 h
	Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	0,0 h
	Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	3892,5 h

Tabella 68 – Ore di disagio termico per ogni stagione

Produzione d'acqua

La produzione di acqua della macchina AWG risulta strettamente legata alle condizioni termo-igrometriche dell'aria, in particolare al punto di rugiada. Nonostante le differenze climatiche tra le località considerate, i valori di produzione risultano complessivamente simili, suggerendo una limitata variabilità tra i casi analizzati (Tabella 69).

Questo indica che, a differenza dei consumi energetici, la produzione idrica è meno sensibile alle variazioni climatiche su scala nazionale, mantenendo una buona stabilità operativa.

ACQUA PRODOTTA			
Milano	144946,09 l	62,55	l/m ²
Roma	165724,75 l	71,52	l/m ²
Bari	150921,90 l	65,13	l/m ²

Tabella 69 – Quantità annua di acqua prodotta

Risparmio economico

L'analisi economica evidenzia come la convenienza dell'impianto vari significativamente in funzione della località.

Il caso di Roma (Grafico 45) con 52.190 € presenta il maggiore risparmio complessivo, seguito da Bari (Grafico 46) con 50.285 € e Milano (Grafico 44) con 45.653 €. Troviamo lo stesso ordine anche per i valori parziali di gas e elettricità.

Questo risultato è coerente con le prestazioni energetiche osservate e conferma che i climi più favorevoli consentono di massimizzare i benefici economici dell'integrazione AWG, grazie a una migliore combinazione tra riduzione dei consumi termici e disponibilità di energia rinnovabile.

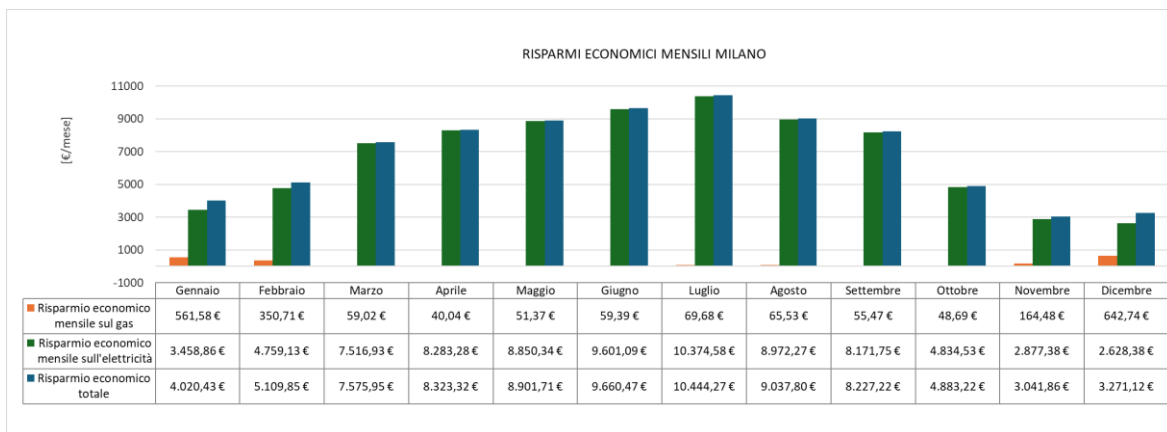


Grafico 44 – Risparmi economici mensili con AWG e FV a Milano

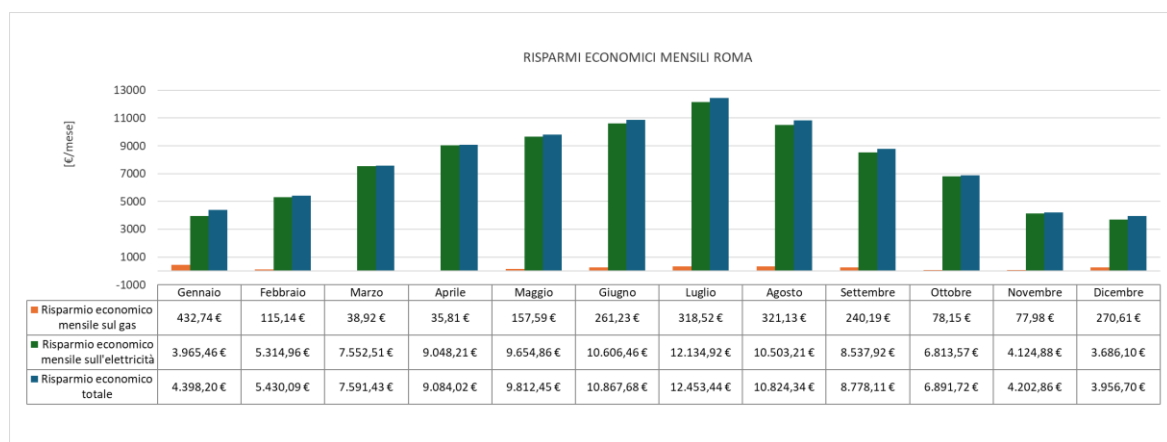


Grafico 45 – Risparmi economici mensili con AWG e FV a Roma

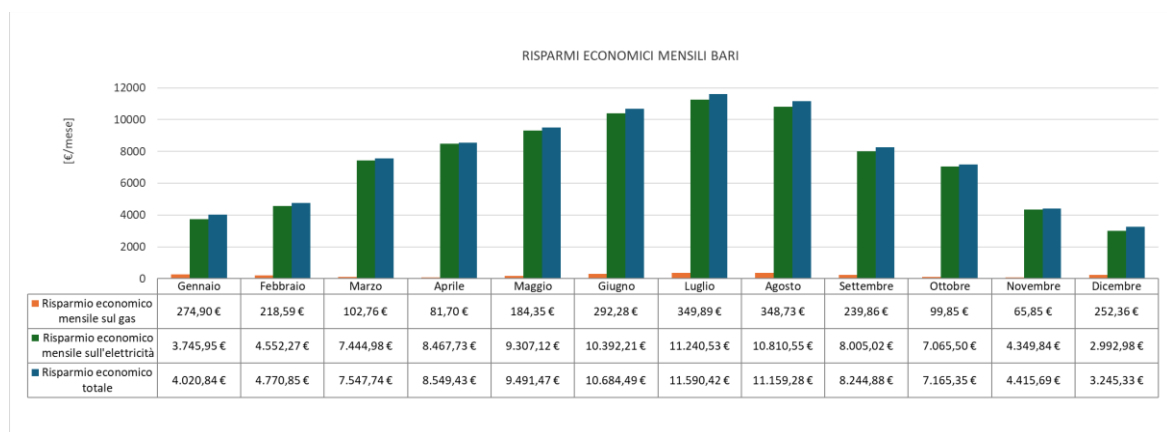


Grafico 46 – Risparmi economici mensili con AWG e FV a Bari

Considerazioni finali

Il confronto tra le diverse località ha evidenziato in maniera chiara come il contesto climatico influenzi in modo determinante le prestazioni dell'impianto integrato con tecnologia AWG.

In tutti gli scenari analizzati, l'introduzione della macchina comporta una riduzione dei consumi di gas naturale, accompagnata però da un aumento del fabbisogno elettrico. Questo comporta uno spostamento del bilancio energetico verso l'energia

elettrica, con conseguenze sia sugli indicatori di prestazione sia sulle emissioni di CO₂.

Il caso di Roma risulta il più favorevole, grazie a condizioni climatiche che consentono di massimizzare il recupero termico e la produzione fotovoltaica. Bari presenta prestazioni intermedie, mentre Milano risulta meno adatta all'adozione della tecnologia, a causa di un clima meno favorevole e di una minore producibilità solare.

Dal punto di vista ambientale ed economico, emerge chiaramente che l'efficacia dell'AWG è strettamente legata alla disponibilità di energia rinnovabile, necessaria per compensare l'aumento dei consumi elettrici. Il comfort interno, invece, rimane sostanzialmente invariato, confermando la validità della soluzione dal punto di vista impiantistico.

In conclusione, lo studio dimostra che l'adozione della tecnologia AWG può rappresentare una soluzione efficace per la riduzione dei consumi termici e la produzione idrica, ma la sua convenienza energetica, ambientale ed economica risulta fortemente dipendente dalle condizioni climatiche locali e dalla presenza di adeguati sistemi di produzione da fonte rinnovabile.

10. CONCLUSIONE

La presente tesi ha avuto come obiettivo l'analisi di possibili strategie di riqualificazione energetica e idrica applicabili a un supermercato, con particolare attenzione all'integrazione di una macchina AWG all'interno del sistema HVAC e alla sua possibile sinergia con un impianto fotovoltaico. Il lavoro è nato dalla volontà di affrontare in modo integrato due temi oggi centrali nella progettazione impiantistica: la riduzione dei consumi energetici e la valorizzazione di risorse altrimenti disperse, come l'acqua di condensa. In questa prospettiva, l'AWG non è stata considerata come una semplice tecnologia "aggiuntiva", ma come una possibile componente di un sistema più ampio, capace di contribuire alla transizione verso edifici più efficienti, resilienti e sostenibili.

L'analisi teorica ha mostrato che la tecnologia AWG presenta un potenziale reale, ma anche limiti altrettanto chiari: la resa dipende fortemente dalle condizioni termigrometriche dell'aria, il fabbisogno elettrico può essere significativo e l'efficacia complessiva aumenta in modo rilevante solo quando il sistema è inserito in una logica di integrazione impiantistica e di supporto da fonti rinnovabili. Proprio per questo, nel caso studio sviluppato, l'AWG è stato valutato non come soluzione autonoma, bensì come elemento inserito in un quadro più esteso di efficientamento, in grado di dialogare con climatizzazione, recuperi energetici e produzione fotovoltaica.

I risultati della simulazione hanno evidenziato che l'integrazione della macchina AWG comporta, in tutti gli scenari, una riduzione dei consumi di gas naturale, ma anche un aumento del fabbisogno elettrico. Tale comportamento conferma che il beneficio energetico non è automatico, ma dipende dalla capacità del sistema di compensare il nuovo carico elettrico con adeguate fonti rinnovabili. Dal confronto tra le tre località analizzate emerge inoltre un'influenza determinante del clima: Roma rappresenta lo scenario complessivamente più favorevole, Bari mostra un comportamento intermedio, mentre Milano risulta meno adatta all'adozione della

tecnologia, soprattutto per la minore producibilità solare e per un contesto climatico meno favorevole al recupero energetico.

Dal punto di vista prestazionale, il modello simulato restituisce valori di EUI pari a circa 567 kWh/m²·anno per Milano, 481 kWh/m²·anno per Roma e 473 kWh/m²·anno per Bari, confermando un comportamento realistico per un edificio della grande distribuzione organizzata, ma anche la presenza di margini di miglioramento, soprattutto dove i carichi di raffrescamento e refrigerazione risultano più rilevanti. Il comfort termico, invece, rimane sostanzialmente invariato rispetto al caso di riferimento, segnale importante perché indica che l'inserimento dell'AWG non compromette la qualità ambientale interna. Anche la produzione idrica risulta coerente con l'obiettivo tecnologico perseguito e, nel complesso, abbastanza stabile tra i casi analizzati.

L'analisi economica conferma una conclusione fondamentale: la convenienza dell'AWG non va valutata in modo isolato. Nel caso studio milanese, l'adozione della sola macchina senza fotovoltaico porta a un incremento dei costi annui, mentre l'integrazione con l'impianto FV ribalta il bilancio economico e rende il sistema più sostenibile. In generale, i risultati mostrano che la soluzione proposta è davvero efficace solo quando l'aumento del fabbisogno elettrico viene compensato da un'adeguata disponibilità di energia rinnovabile. In questo senso, il sistema AWG+FV non migliora soltanto l'impatto ambientale, ma rafforza anche la logica di autonomia e bilanciamento energetico dell'edificio.

In conclusione, questa tesi mostra che l'AWG può rappresentare una tecnologia interessante e promettente per la grande distribuzione organizzata, ma non come soluzione universale. La sua efficacia dipende dal contesto climatico, dalla qualità dell'integrazione impiantistica e dalla presenza di fonti rinnovabili di supporto. Se correttamente progettato, il sistema può contribuire in modo concreto alla riduzione dei prelievi idrici, al recupero di risorse energetiche e alla decarbonizzazione degli edifici commerciali. Il valore principale del lavoro risiede proprio in questo: aver dimostrato che sostenibilità, efficienza e innovazione possono essere affrontate insieme, all'interno di un unico modello di analisi applicato a un caso reale e replicabile.

11. BIBLIOGRAFIA

- ¹ Stati Membri delle Nazioni Unite, Agenda 2030, 2015;
<https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>
- ² Cristina Pacciani, Lorena Cecchini. - BIGBANG: PIOGGIA E SICCIÀ DIVIDONO L'ITALIA OCCHI PUNTATI SULLA STRATEGIA EUROPEA PER RENDERE RESILIENTI I SISTEMI IDRICI. – ISPRA, 21 marzo 2025;
<https://www.isprambiente.gov.it/files2025/area-stampa/comunicati-stampa/comunicato-giornata-acqua2025.pdf>
- ³ Cristina Pacciani, Lorena Cecchini. - DISPONIBILITÀ D'ACQUA, RAGGIUNTO IL MINIMO STORICO: DEFICIT MASSIMI IN SICILIA, SARDEGNA E NEL DISTRETTO DEL FIUME PO. – ISPRA, 17 giugno 2023;
<https://www.isprambiente.gov.it/files2023/area-stampa/comunicati-stampa/comunicato-clima-risorsa-idrica.pdf>
- ⁴ Simona Ramberti, Stefano Tersigni. - Ancora elevate le perdite idriche della rete di distribuzione - ISTAT, 22 marzo 2024;
<https://www.istat.it/wp-content/uploads/2024/03/Report-GMA-Anno-2024.pdf>
- ⁵ Giovanni Braca, Barbara Lastoria, Stefano Mariani, Francesca Piva, Robertino Tropeano. - STANDARDIZED HYDRO-CLIMATIC BALANCE. – ISPRA, 30 giugno 2025;
<https://indicatoriambientali.isprambiente.it/en/water-sources-and-balance/standardized-hydro-climatic-balance>
- ⁶ Pronti, A., Auci, S., Mazzanti, M. - Adopting sustainable irrigation technologies in Italy: a study on the determinants of inter- and intra-farm diffusion. - ECONOMICS OF INNOVATION AND NEW TECHNOLOGY, 2024; 33 (2): 299-322.; <https://dx.doi.org/10.1080/10438599.2023.2183854>
- ⁷ Naguib, R. - Effect of Supermarket Refrigeration Systems on Water Consumption in California. - Energy Engineering, 113(3), 27–37. 2016; <https://doi.org/10.1080/01998595.2016.11689739>
- ⁸ Kramm, G. and Dlugi, R. - Scrutinizing the atmospheric green house effect and its climatic impact. - Natural Science, 3, 971-998, 2011; [10.4236/ns.2011.312124](https://doi.org/10.4236/ns.2011.312124)
- ⁹ Trenberth, K., J. Fasullo e M. Balmaseda. - Earth's Energy Imbalance. - J.Clima. 2014; [10.1175/2008BAMS2634.1](https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1)
- ¹⁰ Wallace, J. M., Hobbs, P. V. - Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2nd ed. - Academic Press. Elsevier Inc. 2006; (<https://doi.org/10.1016/C2009-0-00034-8>) [https://www.gnss-x.ac.cn/docs/Atmospheric%20Science%20An%20Introductory%20Survey%20\(John%20M.%20Wallace,%20Peter%20V.%20Hobbs\)%20\(z-lib.org\).pdf](https://www.gnss-x.ac.cn/docs/Atmospheric%20Science%20An%20Introductory%20Survey%20(John%20M.%20Wallace,%20Peter%20V.%20Hobbs)%20(z-lib.org).pdf)
- ¹¹ Taikan Oki, Shinjiro Kanae. - Global Hydrological Cycles and World Water Resources. – Science, 313, 1068-1072, 2006; <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- ¹² Gerhard Kramm, Ralph Dlugi. - Scrutinizing the atmospheric greenhouse effect and its climatic impact. - Natural Science, Vol.3 No.12, December 16, 2011; <https://www.scribd.com/document/393935365/Peixoto-and-Oort-1992-Physics-of-Climate>
- ¹³ Sito Geass. - <https://www.geass.com/umidita-relativa-assoluta-punto-di-rugiada-e-condensa-sulle-pareti/>
- ¹⁴ Bolton, D. - The Computation of Equivalent Potential Temperature. - Monthly Weather Review, 108(7), 1046-1053, 1980; [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- ¹⁵ Pruppacher, H. R., Klett, J. D., & Wang, P. K. - Microphysics of Clouds and Precipitation. Aerosol Science and Technology, 28(4), 381–382, 1998; <https://doi.org/10.1080/02786829808965531>

-
- ¹⁶ Barry, R.G., & Chorley, R.J. - Atmosphere, Weather and Climate (1st ed.). Routledge. 2009; <https://doi.org/10.4324/9780203871027>
- ¹⁷ Lucia Cattani, Roberto Figoni, Paolo Cattani, Anna Magrini. - Integrated Atmospheric Water Generators for Building Sustainability: A Simulation-Based Approach. - *Energies* 2025, 18(7), 1839; <https://doi.org/10.3390/en18071839>
- ¹⁸ T.A. Ajiwiguna, M.R. Kirom. - Design and optimization of simple atmospheric water generator using thermoelectric module. - *Dinamika Teknik Mesin*. October 2023 13(2):173 <https://doi.org/10.29303/dtm.v13i2.663>
- ¹⁹ Nafise Shafeian, A.A. Ranjbar, Tahereh B. Gorji. - Progress in atmospheric water generation systems: A review. - *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 161, June 2022, Page 112325; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112325>
- ²⁰ Xiuying Huang, Qin Qin, Qinglang Ma, Bo Wang. - Atmospheric Water Harvesting with Metal-Organic Frameworks and Their Composites: From Materials to Devices. - *Water* 2022, 14(21), 3487; <https://doi.org/10.3390/w14213487>
- ²¹ Daniel Beysens, Marc Muselli, Iryna Milimouk, Catherine Ohayon, Simon M. Berkowicz, Emmanuel Soyeux, Marina Mileta, Pascal Ortega. - Application of passive radiative cooling for dew condensation. - *Energy* Volume 31, Issue 13, October 2006, Pages 2303-2315; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.01.006>
- ²² L. Cattani, P. Cattani, R. Figoni, A. Magrini. - Performance Assessment of Atmospheric Water Generators: A Review of Evaluation Tools and Proposal for a Novel Advanced Global Evaluation Index for HVAC–AWG Hybrid Solutions. - *Appl. Sci.* 2024, 14(24), 11793; <https://doi.org/10.3390/app142411793>
- ²³ Robin Peeters, Hannah Vanderschaeghe, Jan Rongé, Johan A. Martens. - Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour. – *Environmental Science Water Research & Technology*, 2020; <https://doi.org/10.1039/D0EW00128G>
- ²⁴ Sito Hydro - Scambiatori di calore a microcanali <https://www.hydro.com/it/global/Alluminio/industries/hvacr/scambiatori-di-calore-a-microcanali/>
- ²⁵ Bruce I. - Dvorak, Sharon O. Drinking water treatment Sediment filtration. - NebGuide 2013; https://www.researchgate.net/publication/282226510_G08-1492_Drinking_Water_Treatment_Sediment_Filtration
- ²⁶ Adenes Teixeira Alves, Dimas José Lasmar, Ires P. A. Miranda, Jamal da Silva Chaar, Jardson dos Santos Reis. -The Potential of Activated Carbon in the Treatment of Water for Human Consumption, a Study of the State of the Art and Its Techniques Used for Its Development. - *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2021 12(06):143-153 <https://doi.org/10.4236/abb.2021.126010>
- ²⁷ U. Spohn. - MEMBRANE SEPARATIONS | Reverse Osmosis. - Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, 2013; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.04614-X>
- ²⁸ World Health Organization (WHO), - Nutrients in Drinking Water. - Water, Sanitation and Health Protection and the Human Environment World Health Organization Geneva, 2003; ISBN: 92 4 159398 9 <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/ee809f3c-d909-4138-9242-002bce630853/content>
- ²⁹ M. Pirnie, Karl G Linden, James Peter Malley. - Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule. U.S. - Environmental Protection Agency (EPA), 2006; <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-10/ultraviolet-disinfection-guidance-manual-2006.pdf>
- ³⁰ Sito Water treatment - Be Ready Utah <https://beready.utah.gov/family-preparedness/12-areas-of-preparedness/water/water-treatment/>

-
- ³¹ World Health Organization - Guidelines for Drinking-water Quality. 2017; ISBN 978-92-4-154995-0 <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/1b7a285e-3635-45dd-a1a9-6068c8f8e173/content>
- ³² Sito EPA. - National Primary Drinking Water Regulations (NPDWRs) <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
- ³³ Testo ufficiale della Direttiva (UE) 2020/2184. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 23 dicembre 2020; <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>
- ³⁴ Irfan Majeed Bhat, Ruheena Tabasum, Ghulam Mohd, Kowsar Majid, Saifullah Lone. - Atmospheric Water Generator Technologies. - Atmospheric Water Harvesting Development and Challenges, 2023; https://doi.org/10.1007/978-3-031-21746-3_1
- ³⁵ REGOLAMENTO (CE) N. 852/2004 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 29 aprile 2004 sull'igiene dei prodotti alimentari. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004R0852>
- ³⁶ REGOLAMENTO (CE) N. 853/2004 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 29 aprile 2004 che stabilisce norme specifiche in materia di igiene per gli alimenti di origine animale. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004R0853>
- ³⁷ Batool Taher Khalaf, Nicolas Lopez Ferber, Mathieu Martins, Matteo Chiesa, Nicolas Calvet - Long-term performance evaluation of VCRS-based atmospheric water generation in arid climates. - Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. - Volume 10, December 2024, 100855; <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100855>
- ³⁸ Potyka, J., Dalibard, A. & Tovar, G. - Energetic analysis and economic viability of active atmospheric water generation technologies. - Discov Appl Sci 6, 153 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05746-z>
- ³⁹ Zahra Ahrestani, Sadegh Sadeghzadeh, Hosein Banna Motejadded Emrooz. - An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water supply. – RSC Advances, 2023; <https://doi.org/10.1039/D2RA07733G>
- ⁴⁰ Lovis, L., Tremain, P., & Moghtaderi, B. - Modelling desiccant-based atmospheric water generation performance in the Australian climate: potential to improve drought resilience in Australia. - Australasian Journal of Water Resources, 2025, 1–12; <https://doi.org/10.1080/13241583.2025.2538317>
- ⁴¹ Lucia Cattani. - Sistemi energetici e risorse idriche: integrazione sostenibile, strumenti di valutazione e casi studi, Indicatori ed indici di valutazione delle prestazioni energetiche e idriche di impianti. – Seminario Wisser 2025; <https://wisher.prin.unige.it/sites/wisher.prin.unige.it/files/2025-05/3%20-%20Indicatori%20e%20indici%20-%20L.%20Cattani.pdf>
- ⁴² Walaa A. Sabbar, Zinah Salman, Sabreen A. Abood. - Hybrid Cooling and Smart Automation in Atmospheric Water Generation: A Sustainable Solution for Water-Scarce Regions. - Research Square, 09 September 2025; <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7432648/v1>
- ⁴³ Ben Gido, Eran Friedler, David M. Broday. - Assessment of atmospheric moisture harvesting by direct cooling, Atmospheric Research. - Volume 182, 2016, Pages 156-162, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.029>
- ⁴⁴ Mohammadreza Hasandust Rostami, Gholamhassan Najafi, Saeid Minaei, Mohammad Hadi Khoshtaghaza. - Design, optimization and performance evaluation of water-energy nexus of an atmospheric water harvesting system (AWHS) based on subsurface cooling and solar power. - Case Studies in Thermal Engineering, Volume 72, 2025, ISSN 2214-157X; <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106378>
- ⁴⁵ Sito Watergen, <https://watergen.com/>

-
- ⁴⁶ Sito Aguaer, <https://aguaer.com/>
- ⁴⁷ Sito HuProTec, <https://www.huprotec.com/>
- ⁴⁸ Sadowski E, Mbonimpa E, Chini CM. - Benchmarks of production for atmospheric water generators in the United States. - PLOS Water 2(6): e0000133, 2023; <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000133>
- ⁴⁹ U.S. Environmental Protection Agency. - Life Cycle and Cost Assessments of Atmospheric Water Generation Technologies and Alternative Potable Water Emergency Response Options. - 19 December 2018; https://pasteur.epa.gov/uploads/10.23719/1503094/AWG_LCA_Report_Final_1.29.19.pdf
- ⁵⁰ EN ISO 16231-1:2013 - Self-propelled agricultural machinery - Assessment of stability - Part 1: Principles; 1/05/2013; <https://store.uni.com/en-iso-16231-1-2013>
- ⁵¹ UNI EN ISO 14031:2013 - Gestione ambientale - Valutazione delle prestazioni ambientali - Linee guida; 24/10/2013; <https://store.uni.com/uni-en-iso-14031-2013>
- ⁵² Parlamento europeo e del Consiglio. - Direttiva UE 2022/2464 – Corporate Sustainability Reporting Directive. 14 dicembre 2022; <http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj>
- ⁵³ OECD. - Incentives to business investment in skills in Italy. – 14 ottobre 2022; <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/it/about/programmes/dg-reform/incentivare-l%27investimento-in-competenze-delle-imprese-italiane/incentives-to-business-investments-in-skills-in-italy-recommendation-for-two-public-policy-instruments-EN.pdf>
- ⁵⁴ ISO 16890-1:2016, “Air filters for general ventilation. Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)”. – 2016; <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16890:-1:ed-1:v1:en>
- ⁵⁵ Aravind, K. - Investigation of the Technological Advancements and Future Prospects of Atmospheric Water Generator Systems. - Journal of Student Research, 2023, 12(3); <https://doi.org/10.47611/jsrhs.v12i3.4684>
- ⁵⁶ M. Arjmandi, E. Aytaç, M. Khayet, N. Hilal. - Next-generation MOFs for atmospheric water harvesting: The role of machine learning techniques. - Coordination Chemistry Reviews, Volume 548, Part 2, 2026, ISSN 0010-8545; <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217211>
- ⁵⁷ Sito QBERG. - Grande Distribuzione Italia 2025: una mappa delle principali insegne. - <https://www.qberg.com/grande-distribuzione-italia-2025-mappa-principali-insegne/>
- ⁵⁸ Osservatorio Nazionale del Commercio. - DEFINIZIONI STATISTICHE ESERCIZI DELLA GRANDE DISTRIBUZIONE ORGANIZZATA. - <https://osservatoriocommercio.mise.gov.it/progettiStatistici/gdo>
- ⁵⁹ Sito inStoremag.it - La Gdo alla prova della sostenibilità. – 12/06/25; <https://www.instoremag.it/distribuzione/la-gdo-alla-prova-della-sostenibilita/20250612.128725>
- ⁶⁰ THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. - DIRECTIVE (EU) 2022/2464 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting. – 14/12/22; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022L2464>
- ⁶¹ DIRETTIVA 2013/34/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO relativa ai bilanci d’esercizio, ai bilanci consolidati e alle relative relazioni di talune tipologie di imprese, recante modifica della direttiva 2006/43/CE del Parlamento europeo e del Consiglio e abrogazione delle direttive 78/660/CEE e 83/349/CEE del Consiglio, 26/06/2013; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32013L0034>

-
- ⁶² FederDistribuzione. - Normativa europea sulla sostenibilità: le imprese del retail moderno in anticipo sui tempi. – 10/06/25; <https://www.federdistribuzione.it/normativa-europea-sulla-sostenibilita-le-imprese-del-retail-moderno-in-anticipo-sui-tempi/>
- ⁶³ Bilancio di sostenibilità Coop 2024 <https://www.coop.it/sites/default/files/2025-11/RappSocCoop-Sintesi-2024-web.pdf>
- ⁶⁴ Bilancio di sostenibilità Conad 2024 <https://chiamo.conad.it/sosteniamo-il-futuro/bilancio-di-sostenibilita/2024>
- ⁶⁵ Bilancio di sostenibilità Lidl Italia 2024 <https://corporate.lidl.it/sostenibilita/iniziative-internazionali/report-di-sostenibilita-2023-2024>
- ⁶⁶ Bilancio di sostenibilità Carrefour 2024 <https://www.carrefour.it/azienda/ufficio-stampa/carrefour-italia-presenta-report-impatto-2024.html>
- ⁶⁷ Andrea Bianchi, Marco Frey, Stefano Zamagni. - RIVOLUZIONE ECONOMIA CIRCOLARE. - Energia Ambiente e Innovazione, 2019; <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2019/12/Energia-ambiente-e-innovazione-n.3-del-2019.pdf>
- ⁶⁸ John C. Radcliffe, Declan Page. - Water reuse and recycling in Australia, history, current situation and future perspectives. - Water Cycle, Volume 1, 2020; <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.005>
- ⁶⁹ Petra Ross, Toon Boonekamp. - Business guide to circular water management: spotlight on reduce, reuse and recycle. - World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 06/06/17; https://docs.wbcsd.org/2017/06/WBCSD_Business_Guide_Circular_Water_Management.pdf
- ⁷⁰ Tesco. - Climate change. - SUSTAINABILITY FACTSHEET 2023/24; https://www.tescopl.com/media/prspnpgq/tesco_factsheets_climatechange_v14.pdf
- ⁷¹ WALMART. - Delivering Shared Value. - FY2025 ESG Report, <https://corporate.walmart.com/content/dam/corporate/documents/esgreport/2025/FY2025-Walmart-ESG-Report.pdf>
- ⁷² Science Based Targets initiative. - SBTi CORPORATE NET-ZERO STANDARD. – Version 1.3, September 2025; <https://files.sciencebasedtargets.org/production/files/Net-Zero-Standard.pdf>
- ⁷³ Sito BibLus, Progetto di un supermercato, la guida tecnica <https://biblus.acca.it/progetto-di-un-supermercato-la-guida-tecnica/>
- ⁷⁴ Sito URBEM sezione Linee guida per edificio commerciale <https://www.urbem.polimi.it/commercial/>
- ⁷⁵ Testo unico della sicurezza. - Requisiti edifici o di locali da destinare a luogo di lavoro in ambiente produttivo e nel terziario. - <https://www.testo-unico-sicurezza.com/requisiti-edifici-o-di-locali-da-destinare-a-luogo-di-lavoro-in-ambiente-produttivo-e-nel-terziario.html>
- ⁷⁶ Catalina Tiberiu, Virgone Joseph, Lordache Vlad. - Study on the impact of the building form on the energy consumption. - Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association; https://www.researchgate.net/publication/267858062_Study_on_the_impact_of_the_building_form_on_the_energy_consumption
- ⁷⁷ Starakiewicz, A., Miąsik, P., Krason, J., & Babiars, B. - Multi-Aspect Shaping of the Building's Heat Balance. - Energies, 17(11), 2702, 2024; <https://doi.org/10.3390/en17112702>
- ⁷⁸ D.Lgs. 81/2008, Allegato IV – punto 1.13 “Servizi igienico-assistenziali” ; <https://tussl.it/allegati/allegato-iv>

-
- ⁷⁹ D.M. 5 luglio 1975 - MODIFICAZIONI ALLE ISTRUZIONI MINISTERIALI 20 GIUGNO 1896 RELATIVAMENTE ALL'ALTEZZA MINIMA ED AI REQUISITI IGIENICO SANITARI PRINCIPALI DEI LOCALI D'ABITAZIONE. - (criteri igienico-sanitari generali per edifici)
<https://www.indicenormativa.it/sites/default/files/Decreto%20Ministero%20della%20Sanita%2005-07-1975.pdf>
- ⁸⁰ UNI 8289 distanze minime tra file di casse e uscite. <https://store.uni.com/uni-8289-1981>
- ⁸¹ Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente Ente Federato all'UNI. - CT 102 "Isolanti e isolamento - Metodi di calcolo e di prova (UNI/TS 11300-1). Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici. Parametri termofisici.– 2014. <https://store.uni.com/uni-ts-11300-1-2014>
- ⁸² Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. - D.M. 3 agosto 2015 – Codice di prevenzione incendi. – aggiornato 2023; <https://www.vigilfuoco.it/servizi-le-aziende-e-i-professionisti/prevenzione-incendi/testi-coordinati-di-prevenzione/codice-prevenzione-incendi>
- ⁸³ Legge 24 marzo 1989, n. 122. - Disposizioni in materia di parcheggi, programma triennale per le aree urbane maggiormente popolate, nonché modificazioni di alcune norme del testo unico sulla disciplina della circolazione stradale. - https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1989_0122.htm
- ⁸⁴ UNI (2014). UNI/TS 11300-1:2014 – Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Ente Italiano di Normazione. <https://store.uni.com/uni-ts-11300-1-2014>
- ⁸⁵ UNI EN 16798-1:2019 - Criteri per l'ambiente interno – Scelte italiane; <https://store.uni.com/uni-en-16798-1-2019-na>
- ⁸⁶ UNI 10339:1995 - Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.- <https://store.uni.com/uni-10339-1995>
- ⁸⁷ D.Lgs. 81/2008 – Sicurezza nei luoghi di lavoro (include comfort e microclima).
<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2008;81~art306>
- ⁸⁸ UNI EN 12464-1:2021 – Illuminazione dei luoghi di lavoro interni <https://store.uni.com/uni-en-12464-1-2021>
- ⁸⁹ Standard 90.1-2022 (I-P Edition) -- Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (ANSI Approved; IES Co-sponsored); https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-90-1-2022-i-p?product_id=2522082
- ⁹⁰ Standard 62.1-2025 -- Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality (ANSI Approved);
https://store.accuristech.com/standards/ashrae-62-1-2025?product_id=3037167
- ⁹¹ REGOLAMENTO DELEGATO (UE) 2019/2018 DELLA COMMISSIONE che integra il regolamento (UE) 2017/1369 del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura energetica degli apparecchi di refrigerazione con funzione di vendita diretta, 11/3/19; https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/2018/oj/ita
- ⁹² REGOLAMENTO (UE) 2019/2024 DELLA COMMISSIONE che stabilisce specifiche per la progettazione ecocompatibile degli apparecchi di refrigerazione con funzione di vendita diretta in applicazione della direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, 1/10/19; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R2024>
- ⁹³ UNI/TS 11300-2:2019, Allegato D – profili d'uso per edifici non residenziali;
<https://www.certifico.com/normazione/news-normazione/uni-ts-11300-2-2019-impianti-di-riscaldamento>

-
- ⁹⁴ Linee guida INAIL / ISPESL per luoghi di lavoro (servizi igienici, docce, mense) <https://biblus.acca.it/download/allegato-iv-requisiti-dei-luoghi-di-lavoro-testo-unico-sulla-sicurezza-dlgs-81-2008/?wpdmdl=121261&refresh=69417752f08ed1765898066>
- ⁹⁵ Linee Guida Agronomiche e Criteri Ambientali Minimi (CAM) <https://www.mase.gov.it/portale/cam-vigenti>
- ⁹⁶ Gestione della Risorsa Idrica (SIGRIAN) <https://sigrian.crea.gov.it/>
- ⁹⁷ Strategia Nazionale del Verde Urbano (Legge 10/2013) https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/strategia_verde_urbano-pdf
- ⁹⁸ EPA: U.S. Environmental Protection Agency. (2015). Report on supermarket energy consumption. Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/2015-03.pdf>
- ⁹⁹ UNI/TR 11552:2014, Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici; <https://store.uni.com/uni-tr-11552-2014>
- ¹⁰⁰ Sito del Comitato Tecnico Italiano; <https://www.cti2000.it/>
- ¹⁰¹ UNI 10349-1:2016 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata; <https://store.uni.com/uni-10349-1-2016>
- ¹⁰² UNI EN ISO 15927-4:2005 - Prestazione termoigrometrica degli edifici - Calcolo e presentazione dei dati climatici - Parte 4: Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento; <https://store.uni.com/uni-en-iso-15927-4-2005>
- ¹⁰³ Scheda tecnica caldaia; https://www.viessmann.ch/content/dam/public-brands/ch/assets_ch_it/fogli-dati-tecnici/gas/Vitocrossal_300_CT3U_IT.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Vitocrossal_300_CT3U_IT.pdf
- ¹⁰⁴ Scheda tecnica del chiller; <https://www.daikin.it/content/dam/document-library/installation-manuals/as/water-cooled-chiller/ewwq-b-ss/EWWQ-B- IOM D-EIMWC00504-14IT Installation%20manuals Italian.pdf>
- ¹⁰⁵ Decreto del Presidente della Repubblica n. 74 - Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari - 16 aprile 2013; https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/2013_0074.htm
- ¹⁰⁶ Comune di Milano - Calendario di accensione degli impianti di riscaldamento Stagione 2025/2026; <https://www.comune.milano.it/argomenti/ambiente-e-animali/calendario-di-accensione-degli-impianti-di-riscaldamento>
- ¹⁰⁷ Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica - Tabella parametri standard nazionali – 20 gennaio 2026; <https://www.ets.minambiente.it/News#520-pubblicazione-parametri-standard-nazionali-anno-2025>
- ¹⁰⁸ Sito URBEM - <https://www.urbem.polimi.it/commercial/>
- ¹⁰⁹ Foster A., Evans J., Maidment G. - Benchmarking of supermarket energy consumption. - 5th IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. Proceedings: Beijing, Chine, 6-8 avril 2018; 2018/04/06; <http://dx.doi.org/10.18462/iir.iccc.2018.0006>
- ¹¹⁰ Sito CENED - <https://www.cened.it/>

¹¹¹ Sito ISPRA pubblicazioni - Fattori di emissione di CO2 nel settore elettrico e analisi della decomposizione delle emissioni – 2012; <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/fattori-di-emissione-di-co2-nel-settore-elettrico-e-analisi-della-decomposizione-delle-emissioni>

¹¹² Standard 55-2023 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI Approved) – 2023; https://store accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-55-2023?product_id=2577096

¹¹³ UNI EN ISO 9920:2004; Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento - 01 marzo 2004; <https://store.uni.com/uni-en-iso-9920-2004>

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo percorso, sento il bisogno, prima ancora che il dovere, di fermarmi un momento e riconoscere tutte le persone che, in modi diversi, hanno reso possibile questo traguardo.

Un sentito ringraziamento va alla prof.ssa Magrini, per la disponibilità al confronto e per il contributo critico, sempre attento, costruttivo e stimolante. Al mio relatore, Dr. Roberto Figoni va la mia più sincera gratitudine per la dedizione e la disponibilità con cui ha seguito ogni fase di questo progetto. Ringrazio inoltre il Dr. Giorgio Lupato per il prezioso sostegno nelle fasi di progettazione: la sua attenzione ai dettagli e la presenza costante, anche nei momenti più complessi, hanno rappresentato per me un esempio concreto di professionalità e passione. A tutti loro va il mio più profondo riconoscimento per la fiducia e l'impegno dimostrati lungo questo percorso.

Se oggi sono arrivato fin qui, lo devo soprattutto alla mia famiglia. Ai miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di scegliere, di sbagliare e di inseguire i miei sogni, va il mio grazie più grande.

A mia sorella, per la sua presenza costante, per il sostegno sincero e per essere, da sempre, un punto di riferimento.

Ai miei familiari, per il sostegno silenzioso ma costante, e per avermi sempre fatto sentire parte di qualcosa di importante.

A Sara, per aver condiviso con me non solo questo percorso, ma ogni difficoltà e ogni conquista: grazie per la pazienza, per la forza e per esserci sempre stata.

Agli amici, ai miei Mbari e a tutte le persone che hanno camminato al mio fianco: grazie per le risate, per il supporto nei momenti più duri e per aver reso questo viaggio qualcosa che porterò con me ben oltre queste pagine.